

SOOJUSFÜÜSIKA

Ülesannete kogu

ANDRES TALVARI
PEETER RANDOJA

Käesolev ülesannete kogu on mõeldud abiks Sisekaitseakadeemia päästekolledžis õppeaine Soojusfüüsika õpetamisel. Ülesannete lahendamiseks vajalikud valemid saab ka akadeemias välja antud A. Talvari õppevahendist „Soojusfüüsika alused”.

Selles ülesannete kogus on iga peatüki alguses toodud näidisülesannete lahendused.

Sisukord

1. Soojusjuhtivus	3
2. Konvektiivne soojusvahetus.....	6
3. Soojusvahetus auru kondensatsioonil.....	12
4. Soojusvahetus vedelike keemisel	17
5. Kiirgussoojusvahetus	21
LISAD	45
Tabel L 1. Kuiva õhu füüsikalised parameetrid atmosfäärirõhul.....	45
Tabel L 2. Suitsugaaside füüsikalised parameetrid	45
Tabel L 3. Veeauru füüsikalised parameetrid	46
Tabel L 4. Vee füüsikalised parameetrid küllastuspiiril	46
Tabel L 5. Mõnede vedelike soojusfüüsikalised omadused	47
Tabel L 6. Erinevate materjalide täiskiirguse mustusaste	48
Kasutatud kirjandus.....	49

© Autoriõigused Andres Talvari, Peeter Randoja ja Sisekaitseakadeemia, 2007

1. SOOJUSJUHTIVUS

1.1. Määrata betoonseina mittekuumutatava pinna temperatuur püsiva tulekahju tingimustes. Seinä paksus on $\delta = 220 \text{ mm}$ ($0,22 \text{ m}$), betooni mahukaal on $\gamma = 2 \text{ T/m}^3$. Tulekahju poolsele pinnale on betoonseina temperatuur $t_{w1} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ja soojusvoog $q = 1900 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h)}$. Betooni soojusjuhtivustegur (käsiraamatust) $\lambda = 1,06 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$.

$$1 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} = 1163 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}.$$

Lahendus:

Kasutame Fourieri seadust.

$$T_{w2} = t_{w1} - q (\delta / \lambda) = 500 - 1900 (0,22 / 1,06) = 155 \text{ }^\circ\text{C}$$

1.2. Määrata kuidas muutub 4 cm laudkattega betoonseina mittekuumutatava pinna temperatuur. Puidu soojusjuhtivustegur risti kiududega $\lambda_2 = 0,15 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$. Laudkatte välispinna temperatuur on $t_{w3} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$. Ülejäänud tingimused on samad kui eelmises ülesandes (peale q).

Lahendus:

1. Betoonplaadi termiline takistus on

$$R_1 = \delta_1 / \lambda_1 = 0,22 / 1,06 = 0,2075 (\text{ m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}) / \text{ kkal}$$

Katte termiline takistus on

$$R_2 = \delta_2 / \lambda_2 = 0,04 / 0,15 = 0,267 (\text{ m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}) / \text{ kkal}$$

2. Mittekuumutatava puitkattega betoonseina pinna temperatuur on

$$t_{w2} = t_{w1} - (t_{w1} - t_{w3}) R_1 / (R_1 + R_2) = 500 - (500 - 75) 0,2075 / (0,2075 + 0,267) = 342^\circ\text{C}$$

1.3. Määrata terasest aurutoru välispinna temperatuur. Aurutoru diameeter on $d_1 / d_2 = 50 / 53 \text{ mm}$. Aurutoru sisepinna temperatuur on $t_{w1} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Soojusvoog aurutoru 1 jooksva meetri kohta on $q_l = 270 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h)}$. Terasel soojusjuhtivustegur $\lambda_t = 40 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$.

Lahendus:

$$t_{w2} = t_{w1} - (q_l / 2\pi\lambda) \ln (d_2 / d_1) = 150 - 270 / (2 \cdot 3,14 \cdot 40) \ln (53 / 50) = 149,938^\circ\text{C} \text{ (} 150^\circ\text{C)}.$$

Näeme, et tuleohutuse seisukohalt lähtudes võime arvestada isoleerimata aurutoru välispinna temperatuuri võrdseks aurutoru liikuva auru temperatuuriga.

1.4. Määrata aurutoru isolatsiooni paksus tingimusel, et isolatsioonikihi välispinna temperatuur ei ületaks $70 \text{ }^\circ\text{C}$ kraadi. Soojusisolatsiooni soojusjuhtivustegur on $\lambda_T = 0,2 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$. Teised lähteandmed on samad kui eelmises ülesandes.

Lahendus:

1. Soojusisolatsiooni välisdiameeter määratakse järgneva valemiga:

$$\begin{aligned}d_3 &= d_2 \exp \left[\lambda_T (2\pi \Delta t / q_l - 1 / \lambda_t \cdot 2,303 \ln (d_2 / d_1)) \right] = \\&= 53 \exp \left[0,2 (2 \cdot 3,14 \cdot 80 / 270 - 1 / 40 \cdot 2,303 \cdot 0,025) \right] = \\&= 53 \exp (0,2 \cdot 1,85) = 53 e^{0,37} = 53 \cdot 1,45 = 77 \text{ mm}\end{aligned}$$

2. Soojusisolatsiooni paksus

$$\delta_T = (d_3 - d_2) / 2 = (77 - 53) / 2 = 12 \text{ mm}.$$

1.5. Määrata kerakujulise vedelgaasi mahuti soojusisolatsiooni paksus tingimusel, et temperatuur soojusisolatsiooni sisepinnal ei tõuseks üle 40 °C. Reservuaari diameeter on $d_1 = 10 \text{ m}$. Reservuaar on olnud pikaajalise soojuskiirguse mõju all (tulekahju leek / lombi-tuli), mille tulemusel on soojusisolatsiooni välispinna temperatuur tõusnud $t_{\omega 1} = 1000 \text{ °C}$ -ni. Soojusisolatsiooni soojusjuhtivustegur, kus on arvestatud temperatuuri parandusega on $\lambda_t = 0,1 \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$. Soojusvoo tihedus on $q = 830 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Lahendus:

1. Reservuaari pinna poolt vastuvõetav kogu soojusvoog

$$Q = q F = q \pi d_1^2 = 830 \cdot 3,14 \cdot 10^2 = 241\,000 \text{ kkal} / \text{h}$$

Soojusisolatsiooni välisdiameeter

$$d^2 = Q / (Q/d_1) - 2\pi \lambda_t \Delta t = 241\,000 / (241\,000 / 10) - 2 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 960 = 10,25 \text{ m}$$

2. Soojusisolatsiooni paksus

$$\delta_T = (d_2 - d_1) / 2 = (10,25 - 10) / 2 = 0,125 \text{ m}$$

Leegi lühiaegsel toimel on tegemist mittestatsionaarse soojusjuhtivusega, sel juhul on lubatav isolatsiooni paksus tunduvalt väiksem.

1.6. Määrata ahju seina välistemperatuur ahjusuu piirkonnas, kui sein on tehtud 0,125 m paksustest šamott-tellistest. Temperatuur ahju sees on 1253 K ja soojusvoo tihedus 3400 W / m². Tellise soojusjuhtivustegur võtta jääva suurusena $\lambda = 1,25 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$.

Vastus: $T_2 = 913 \text{ K}$

1.7. Lahendada eelmine ülesanne tingimusel, kus tellise soojusjuhtivustegur oleneb temperatuurist ja on antud võrrandiga $\lambda = 0,835 + 5,8 \cdot 10^{-4} (T - 273)$.

Vastus: $T_2 = 941 \text{ K}$

1.8. Leida ahjuukse seina paksus, kui temperatuur tema sisepinnal on 673 K, soojusvoo tihedus 1130 W / m² ja välispinna temperatuur on 363 K. Soojusjuhtivusteguri väärtus on $\lambda = 0,91 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$.

Vastus: $\delta = 0,249 \text{ m}$

1.9. Lahendada eelmine ülesanne tingimusel, kus soojusjuhtivustegur oleneb temperatuurist ja on antud võrrandiga $\lambda = 0,835 + 5,8 \cdot 10^{-4} (T - 273)$.

Vastus: $\delta = 0,3 \text{ m}$

1.10. Siledat pinda on vaja katta soojusisolatsiooniga selliselt, et sooja kadu oleks 450 W/m^2 . Isoleeritava pinna temperatuur on 723 K , isolatsiooni välispinna temperatuur on 323 K . Leida soojusisolatsiooni paksus kui:

1.10-1) soojusisolatsiooniks on soveliid, mille $\lambda = 0,104 + 8,9 \cdot 10^{-4} (T - 273)$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

1.10-2) soojusisolatsiooniks on asbotermiit, mille $\lambda = 0,109 + 1,25 \cdot 10^{-4} (T - 273)$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Vastus: 1.10-1) $\delta = 0,135 \text{ m}$; 1.10-2) $\delta = 0,1 \text{ m}$

1.11. Arvutada teatrilava tuletõkke eesriide soojusisolatsiooni paksus, kui soojusisolatsiooni poolne temperatuur on 1373 K ja vastaspoolel 433 K . Soojusvoo tihedus eesriide pinnale on $1,8 \text{ kW} / \text{m}^2$.

1.11-1) soojusisolatsiooniks on soveliid, mille $\lambda = 0,104 + 8,9 \cdot 10^{-4} (T - 273)$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

1.11-2) soojusisolatsiooniks on vermikuliit, mille $\lambda = 0,081 + 2,32 \cdot 10^{-4} (T - 273)$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Vastus: 1.11-1) $\delta = 0,098 \text{ m}$; 1.11-2) $\delta = 0,051 \text{ m}$

1.12. Kuivatuskambri seinad on kaetud 250 mm paksuste punaste tellistega ja kiulise $0,02 \text{ m}$ paksuse ehituskatteriidega. Tellisseina välispinna temperatuur on 383 K ja ehituskatteriide välispinna temperatuur on 289 K . Punase tellise soojusjuhtivustegur on $\lambda = 0,7 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, kiulisel katteriidel $\lambda = 0,056 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$. Määrata soojuskadu läbi 1 m^2 suuruse seina ja kihtidevaheline temperatuur.

Vastus: $q = 119 \text{ W} / \text{m}^2$; $T_2 = 340,5 \text{ K}$

1.13. Terastoru diameetriga $d_1 / d_2 = 100 / 110 \text{ mm}$ on kaetud kahe isolatsioonikihi $\delta_2 = \delta_3 = 0,05 \text{ m}$. Terastoru soojusjuhtivustegur on $\lambda = 50 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$. Toru sees on temperatuur 250°C , isolatsiooni välispinnal 90°C . Määrata toru 1 jooksva meetri soojuskadu ja temperatuur isolatsioonikihtide kokkupuutepinnal. Toru katva isolatsiooni soojusjuhtivustegur on $\lambda = 0,06 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, välise isolatsioonikihi soojusjuhtivustegur on $\lambda = 0,12 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$.

Vastus: $q = 71,65 \text{ W} / \text{m}$; $T_3 = 127^\circ\text{C}$

1.14. Lahendada eelmine ülesanne tingimustel, et toru katva isolatsiooni soojusjuhtivustegur on $\lambda = 0,12 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ ja välise isolatsiooni soojusjuhtivustegur on $\lambda = 0,06 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$.

Vastus: $q_1 = 84,5 \text{ W} / \text{m}$; $T_3 = 133,7^\circ\text{C}$

1.15. Kerakujulise reaktori sisediameeter on 1 m , seina ja isolatsioonikihi paksus kokku 65 mm . Soojusjuhtivusteguri ekvivalent on $\lambda = 1 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$. Määrata soojusvootihedus reaktori sise- ja välispinnale, kui reaktori sisepinna temperatuur on 160°C ja välispinnal 60°C .

Vastus: $q_{\text{sise}} = 1738,46 \text{ W} / \text{m}^2$; $q_{\text{välis}} = 1361,5 \text{ W} / \text{m}^2$

1.16. Sfäärilise kujuga veepaagi välisdiameeter on 3 m. Veepaaki on vaja soojustada selliselt, et soojakaod ei ületaks 1000 W. Soojusisolatsiooni ja paagi metallseina kokkupuutepinna temperatuur on 276 K, soojusisolatsiooni välispinna (õhu käes) temperatuur on 260 K. Isolatsioonimaterjaliks on gaasbetoon, mille soojusjuhtivustegur on $\lambda = 0,093 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$. Leida soojusisolatsiooni paksus.

Vastus: $\delta_{\text{isol}} = 11 \text{ cm}$.

2. KONVEKTIIVNE SOOJUSVAHETUS

2.1. Määrata sisetulekahju tingimustes soojushulk Q, mida saab sein põlemisgaasidelt konvektiivsel soojusvahetusel. Sein kõrgus $h = 2,7 \text{ m}$, laius $L = 6 \text{ m}$. Gaaside temperatuur $t_f = 800^\circ\text{C}$, temperatuur sein pinnal $t_w = 580^\circ\text{C}$.

Lahendus:

1. Põlemisgaaside füüsikalised parameetrid temperatuuril $t_f = 800^\circ\text{C}$ saame tabelist L 2:

$$\lambda = 7,87 \cdot 10^{-2} \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}) ; \nu = 131,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s};$$

$$\beta = 1 / (T_0 + t_f) = 1 / (273 + 800) \text{ } 1/\text{deg}.$$

$$\text{Prandtl'i arv } Pr = 0,6$$

2. Grashofi ja Prandtl'i arvu korrutis:

$$\text{GrPr} = [\beta g (t_f - t_w) h^3] / \nu^2 \cdot (\nu / a) = [9,81 (800 - 580) 2,7^3 \cdot 10^{12} / 1073 (131,8)^2] \cdot 0,6 = 1,36 \cdot 10^9$$

Liikumisel on üleminekurežiim.

Nusselti arvu keskmine väärtus Nu leitakse vahemikus, mis on arvutatud järgmiste kriteeriaalvõrranditega a ja b

$$\text{a: } Nu_f = 0,75 (\text{GrPr})^{0,25} \cdot (Pr_f/Pr_w)^{0,25}$$

$$\text{b: } Nu_{fx} = 0,15 (\text{Gr}_{fx} Pr_{fx})^{1/3} \cdot (Pr_f/Pr_w)^{0,25}$$

$$\begin{aligned} 3. \text{ Nusselti arv on võrrandi a järgi } Nu'_f &= 0,75 (\text{GrPr})^{0,25} \cdot (Pr_f/Pr_w)^{0,25} = \\ &= 0,75 (1,36 \cdot 10^9)^{0,25} \cdot 1 = 145; \end{aligned}$$

$$\text{ja võrrandi b järgi } Nu''_f = 0,15 (\text{GrPr})^{0,33} \cdot (Pr_f/Pr_w)^{0,25} = 0,15 (1,36 \cdot 10^9)^{0,33} \cdot 1 = 166;$$

Kordaja $(Pr_f/Pr_w)^{0,25}$ võetakse tehnilistel arvutustel gaasidel võrdseks ühega.

4. Soojusvahetustegur on vastavalt

$$\alpha' = (Nu'_f \cdot \lambda) / h = 145 \cdot 7,87 / 2,7 \cdot 10^2 = 4,22 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

$$\alpha'' = (Nu''_f \cdot \lambda) / h = 166 \cdot 7,87 / 2,7 \cdot 10^2 = 4,66 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

Võtame järgnevatiks arvutusteks soojusvahetusteguri keskmise väärtuse:

$$\alpha_{\text{sk}} = (\alpha' + \alpha'') / 2 = (4,22 + 4,66) / 2 = 4,44 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

5. Sein poolt vastuvõetav soojushulk on

$$Q = \alpha F (t_f - t_w) = 4,44 \cdot 2,7 \cdot 6 (800 - 580) = 1,58 \cdot 10^4 \text{ kkal/h}$$

Ümbritsevate konstruktsioonielementide poolt vastuvõetavat soojushulka saab kasutada konstruktsiooni soojusarvutustes, samuti saab leida ka tulekahju temperatuuri ruumis.

2.2. Määrata soojusvoo tihedus läbi vaheseina õhkvahe paksusega $\delta = 8 \text{ cm}$. Õhkvahe piiravate pindade temperatuurid on $t'_w = 500^\circ\text{C}$ ja $t''_w = 300^\circ\text{C}$

Lahendus:

1. Õhu füüsikalised parameetrid antud temperatuuril leiame tabelist L 1.

$$t_m = (t'_w + t''_w) / 2 = (500 + 300) / 2 = 400^\circ\text{C}$$

$$\lambda_m = 4,48 \cdot 10^{-2} \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}) ; v_m = 63,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \text{Pr} = 0,678$$

2. Grashoffi ja Prandtl'i arvude korrutis $(\text{GrPr}) = (\beta \cdot g \Delta t \delta^3) / \nu^2 =$

$$= [1 / (273 + 400)] \cdot [(9,81 \cdot 200 \cdot 0,08^3) / (63,09 \cdot 10^{-6})^2] \cdot 0,678 = 2,54 \cdot 10^5;$$

$10^3 < \text{GrPr} < 10^6$, järelikult on konveksioonitegur ϵ_k vaja määrata valemiga a:

$$\text{a. : } \epsilon_k = 0,105 (\text{GrPr})_m^{0,3}$$

$$\epsilon_k = 0,105 (\text{GrPr})_m^{0,3} = 0,105 (2,54 \cdot 10^5)^{0,3} = 4,38$$

3. Soojusjuhtivuse ekvivalenttegur on

$$\lambda_{ekv} = \epsilon_k \lambda = 4,38 \cdot 4,48 \cdot 10^{-2} = 0,185 \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

4. Soojusvoo tihedus

$$q = (\lambda_{ekv} / \delta) (t'_w - t''_w) = (0,185 / 0,08) (500 - 300) = 464 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

2.3. Määrata suitsugaasidest tulenev soojusvoo tihedus $0,125 \times 0,25 \text{ m}$ mõõtmetega suitsulõõri sisepinnal. Suitsugaaside liikumiskiirus on $\omega = 3 \text{ m/s}$. Gaaside temperatuur $t_f = 400^\circ\text{C}$, suitsulõõri sisepinna temperatuur on $t_w = 310^\circ\text{C}$.

Lahendus:

1. Suitsugaaside füüsikalised parameetrid antud temperatuuril $t_f = 400^\circ\text{C}$ on:

$$\lambda = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}) ; \nu = 60,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \text{Pr} = 0,64.$$

2. Iseloomulik joonmõõde on

$$l = d_{ekv} = 4F / U = (4 \cdot 0,125 \cdot 0,25) / 2 (0,125 + 0,25) = 0,167 \text{ m}$$

3. Reinoldsi kriteerium:

$$\text{Re} = (\omega d_{ekv}) / \nu = (3 \cdot 0,167) / (60,38 \cdot 10^{-6}) = 8,3 \cdot 10^3$$

Liikumine on ülemineku režiimil. Arvestuslikult kasutame kriteeriaalvõrrandit (a).

Kui mitte arvestada vaba konveksiooni mõju üleminekurežiimil, siis funktsioon K_o oleneb ainult kriteeriumist Re_f .

4. Nusselti arv kriteeriaalvõrrandi (a) järgi: $Nu_f = K_o Pr_f^{0,43} (Pr_f / Pr_w)^{0,25} = 28 \cdot 0,64^{0,43} \cdot 1 = 23,1$

$Re = 8,3 \cdot 10^3$ puhul (tabel 2.1) $K_o = 28$.

Tabel 2.1. Funktsiooni K_o väärtused $Re_f = (2,3 \dots 10) \cdot 10^3$ väärtustel

$Re_f \cdot 10^3$	2,3	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10
K_o	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

5. Soojusvahetustegur konvektiivsel soojusvahetusel

$$\alpha = (Nu_f \cdot \lambda) / d_{ekv} = (23,1 \cdot 49) / (0,167 \cdot 10^2) = 6,77 \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

6. Soojusvoo tihedus

$$q = \alpha (t_f - t_w) = 6,77 (400 - 310) = 610 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

2.4. Kõrgtemperatuuriline soojuskandja (difenüülsegu) liigub ringkanalis, mille siseläbimõõt on $d_1 = 24$ mm ja välisläbimõõt $d_2 = 38$ mm kiirusega 1 m/s. Soojuskandja keskmine temperatuur on $t_f = 200^\circ\text{C}$, ringkanali pinna temperatuur on $t_w = 160^\circ\text{C}$. Määrata soojusvoo tihedus soojuskandjalt ringkanali seintele.

Lahendus:

1. Soojuskandja füüsikalised parameetrid antud temperatuuril $t_f = 200^\circ\text{C}$ on tabelis L 5:

$$\lambda = 0,095 \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}) ; \quad v = 0,446 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2 ; \quad Pr_f = 8,6; \quad Pr_w = 10,3$$

2. Reinoldsi kriteerium

$$Re_f = (w d_{ekv}) / v = [w (d_2 - d_1)] / v = 1 (0,038 - 0,024) / 0,446 \cdot 10^{-6} = 3,14 \cdot 10^4$$

3. Nusselti kriteerium

$$Nu_f = 0,017 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} (Pr_f / Pr_w)^{0,25} (d_2/d_1)^{0,18} =$$

$$0,017 \cdot (3,14 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 8,6^{0,4} \cdot (8,6/10,3)^{0,25} \cdot (38/24)^{0,18} = 168$$

4. Soojusvahetustegur

$$\alpha = (Nu_f \cdot \lambda) / d_{ekv} = (168 \cdot 0,095) / 0,014 = 1140 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

5. Soojusvoo tihedus

$$q = \alpha (t_f - t_w) = 1140 (200 - 160) = 4,56 \cdot 10^4 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

2.5. Määrata soojushulk, mida annab malekujuliselt paigutatud õhusoojendustorustik 1 tunni vältel teda läbivale õhule. Torustik koosneb $n_1 = 18$ reast piki õhuvoolu asetsevatest torudest ja $n_2 = 15$ reast risti õhuvoolule asetsevatest torudest. Õhu liikumiskiirus on 1,54 m/s, keskmine õhutemperatuur on 80°C , keskmine torustiku pinnatemperatuur on 160°C . Torude välisläbimõõt on $d_2 = 38$ mm, torude pikkus on $L = 2350$ mm; $s_1 = s_2 = d_2$.

Lahendus:

1. Õhu füüsikalised parameetrid saame tabelist L 1 vastavalt temperatuurile $t_f = 80^\circ\text{C}$:

$$\lambda = 2,62 \cdot 10^{-2} \text{ kkal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}); \quad \nu = 21,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \quad \text{Pr}_f = 0,692$$

2. Nusselti kriteerium määratakse võrrandiga (a),

$$(a) \text{Nu}_f = C \text{Re}_f^n \text{Pr}_f^{0,33} (\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0,25} \varepsilon_i \varepsilon_s,$$

kus $C = 0,41$; $\text{Re}_f = (\omega d_2) / \nu = (1,54 \cdot 0,038) / (21,09 \cdot 10^{-6}) = 2700$; $n = 0,6$;

$$\text{Pr}_f / \text{Pr}_w \approx 1; \quad \varepsilon_i = 1 \text{ (kolmandale ja järgnevatele ridadele);}$$

$$s_1/s_2 = 1 < 2; \quad \varepsilon_s = (s_1/s_2)^{1/6} = 1$$

Seega on meil

$$\text{Nu}_f = 0,41 \cdot 2700^{0,6} \cdot 0,692^{0,33} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 41$$

3. Soojusvahetustegur kolmandale ja järgnevatele ridadele:

$$\alpha_3 = (\text{Nu}_f \cdot \lambda) / d_2 = (41 \cdot 2,62) / (0,038 \cdot 100) = 27,2 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

Keskmine soojusvahetustegur

$$\alpha_{\text{ksk}} = [0,6\alpha_3 + 0,7\alpha_3 + (n_1 - n_2)\alpha_3] / n_1 =$$

$$= (17 + 19,4 + 444) / 18 = 26,1 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

4. Soojushulk $Q = \alpha_{\text{ksk}} \cdot F (t_w - t_f) = \alpha_{\text{ksk}} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot L \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \Delta t =$

$$= 26,1 \cdot 3,14 \cdot 0,038 \cdot 2,35 \cdot 18 \cdot 15 \cdot 80 = 1,52 \cdot 10^5 \text{ kkal/h}$$

Leitud soojushulka saab kasutada soojuskandja temperatuuri määramisel tema väljumisel õhusoojendist ja kaloriiferseadme tuleohutuse hindamisel.

2.6. Soojusvahetaja torus läbimõõduga $d = 7 \text{ mm}$ voolab vesi kiirusega $w = 0,3 \text{ m/s}$. Vee temperatuur sisenemisel on $t_{v1} = 5^\circ\text{C}$ ja väljumisel $t_{v2} = 15^\circ\text{C}$, toru keskmine temperatuur on $t_{\text{ksk}} = 50^\circ\text{C}$. Arvutada keskmine soojusärandetegur veelt toru seinale, kui toru pikkus on $l = 0,5 \text{ m}$.

Vastus: $\alpha = 935,8 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

2.7. Tuletõrje paakauto vee soojendamiseks auto väljalaskegaasidega on paaki monteeritud horisontaalne torustik pikkusega $l = 2 \text{ m}$ ja siseläbimõõduga $d = 60 \text{ mm}$. Väljalaskegaaside liikumiskiirus torustikus on $w = 1,7 \text{ m/s}$ ja nende keskmine temperatuur on $t_v = 350^\circ\text{C}$. Määrata soojusäraande teguri väärtus väljalaskegaasidelt torustiku pinnale ja soojusvoog, kui torustiku seina temperatuur on $t_s = 50^\circ\text{C}$.

Vastus: $\alpha = 5,62 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}); \quad Q = 635,7 \text{ W}$

2.8. Veesoojendi vertikaaltorudesse suunatakse vesi alt üles suunas, vee kulu ühes torus on $G = 61,2 \text{ kg/h}$. Torude sisemine läbimõõt on $d = 15 \text{ mm}$ ja nende pikkus $l = 1,3 \text{ m}$. Vee temperatuur sisenemisel on $t_{v1} = 20^\circ\text{C}$. Määrata soojusvoog, mille saab vesi torult ja vee temperatuur väljumisel, kui toru seina temperatuur on $t_s = 80^\circ\text{C}$.

Vastus: $Q_s = 1581,9 \text{ W}; \quad t_{v2} = 42,3^\circ\text{C}$

2.9. Vertikaalsetes õlijahutustorustikus diameetriga $d = 14 \text{ mm}$ liigub jahutatav trafoõli suunaga alt üles, õli kulu ühes torus on $G = 50 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$. Keskmine õli temperatuur torustikus on $t_v = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, toru seina temperatuuri hoitakse ühtlasena $t_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Määrata trafoõlilt antav soojusvoog, kui õlijahutil on $n = 80$ paralleelset ühendatud toru pikkusega $l = 1 \text{ m}$.

Vastus: $Q = 45050 \text{ W}$

2.10. Siugtoru-tüüpi veesoojendi on keeratud $d = 10 \text{ mm}$ siseläbimõõduga torust raadiusega $R = 80 \text{ mm}$. Vee liikumiskiirus siugtorus on $w = 1,25 \text{ m/s}$, vee temperatuurid on sisenemisel $t_{v1} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $t_{v2} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Määrata keskmine soojusvoo tihedus torustiku pikkuse suhtes, mis tagaks toru keskmise temperatuuri $t_k = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ –l tasemel.

Vastus: $q = 645,7 \text{ kW/m}^2$

2.11. Tuletõrjevoolikus läbimõõduga $d = 66 \text{ mm}$ liigub vesi, vee kulu on $G = 10 \text{ kg/s}$. Voolikusse sisenemisel on vee temperatuur $t_{v1} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$, vooliku seina temperatuur on $t_s = 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Määrata vee temperatuur voolikust väljumisel, kui vooliku pikkus on $l = 60 \text{ m}$.

Vastus: $t_{v2} = 2,6 \text{ }^\circ\text{C}$

2.12. Ristkülikukujulises $a \times b = 15 \times 30 \text{ cm}$ suitsulõõris liiguvad põlemisgaasid kiirusega $w = 5 \text{ m/s}$. Gaaside keskmine temperatuur on $t_g = 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Lõõri pikkus on $l = 6 \text{ m}$. Leida põlemisgaaside soojusäraandegur ja soojusvoog, mis antakse ära põlemisgaaside poolt, kui lõõri pinnatemperatuur on $t_l = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vastus: $\alpha = 12,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$; $Q = 6696 \text{ W}$

2.13. Toru-toru tüüpi ringikujulises soojusvahetis liigub trafoõli kiirusega $w = 3 \text{ m/s}$. Õli keskmine temperatuur toru pikkusel on $t_0 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sisemise toru seina temperatuur on $t_s = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Leida keskmine soojusäraandegur, kui ringkanali sise- ja välisläbimõõt on vastavalt $d_1 = 32 \text{ mm}$ ja $d_2 = 56 \text{ mm}$ ja pikkus on $l = 2 \text{ m}$.

Vastus: $\alpha = 1054 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

2.14. Aurukatla torukimpu kuumutavad pikisuunas kiirusega $w = 9 \text{ m/s}$ liikuvad suitsugaasid. Torud, mille välisdiameeter on $d = 60 \text{ mm}$ ja pikkus $l = 2,5 \text{ m}$ asetsevad male- kujuliselt ühesuguse sammuga $s_1 = s_2 = 120 \text{ mm}$. Suitsugaaside temperatuur torukimpu sisenemisel on $t_{sg1} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ja väljumisel torukimbust $t_{sg2} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ning toru pinna keskmine temperatuur on $t_t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Leida konvektsiooni soojusäraandegur suitsugaasidelt torukimbu torude seintele.

Vastus: $\alpha = 18,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

2.15. Toru, mille välisdiameeter on $d = 30 \text{ cm}$ jahutatakse temaga risti voolava glütseriiniga, mille temperatuur on $t_v = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ja voolu kiirus $w = 2 \text{ m/s}$. Määrata toru välispinna temperatuur, kui võetava soojusvoo tihedus on $q = 150 \text{ kW/m}^2$.

Vastus: $t_s = 107 \text{ }^\circ\text{C}$

2.16. Õhu soojendamiseks on põlemisgaaside väljumislööri paigaldatud koridortüüpi torukimp. Toru välisläbimõõt on $d = 51 \text{ mm}$. Ühes reas on 8 toru telgedevahelise kaugusega $s_1 = 120 \text{ mm}$. Torukimbus on 7 rida, mis asetsevad teineteisest $s_2 = 200 \text{ mm}$ kaugusel. Torude välispinna keskmine temperatuur on $t_s = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, torudevahelises ruumis liikuvate põlemisgaaside keskmine temperatuur on $t_g = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. Määrata põlemisgaaside poolt antava soojusvoo tihedus, kui nende liikumiskiirus torukimbu piirkonnas on $w = 10 \text{ m/s}$ ning torude pikkus kimbus on $l = 1,2 \text{ m}$.

Vastus: $Q = 110170 \text{ W}$

2.17. Ventilaator suunab horisontaalse õhuvoolu piki õliradiaatori pinda, mille pikkus on $0,75 \text{ m}$. Õhuvoolu kiirus on $w = 5 \text{ m/s}$ ja temperatuur on $t_\delta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Määrata radiaatorilt õhule antava soojusvoo suurus ja keskmine soojusäraandetegur, kui radiaatori temperatuur on $t_r = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ja paneeli kõrgus $h = 0,5 \text{ m}$.

Vastus: $\alpha = 10,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $Q = 455 \text{ W}$

2.18. Puumaja seinale langeb kõrval põlevalt majalt soojusvoog $Q_1 = 27 \cdot 10^3 \text{ W}$. Maja seinale puhub tuul kiirusega $w = 12 \text{ m/s}$ temperatuuril $t_\delta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Leida millise temperatuurini tõuseb seina temperatuur kui tema mõõdud on $h = 3 \text{ m}$ ja $l = 6 \text{ m}$.

Vastus: $t_s = 58,6 \text{ }^\circ\text{C}$

2.19. Kui kõrgele tõuseb seina temperatuur eelmise ülesande lähtetingimustel, kui tuule kiirus on 4 m/s ; 25 m/s ?

Vastus: $t_s = 127 \text{ }^\circ\text{C}$; $37 \text{ }^\circ\text{C}$

2.20. Trafoõli hoidmiseks nõutaval temperatuuril $t_\delta = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ on õlipaaki paigaldatud horisontaalsed (diameetriga $d = 25 \text{ mm}$) soojendustorud temperatuuriga $t_t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Määrata soojusäraandetegur torude pinnalt õlile tingimustel, kus torude vahekaugus on väga suur, nii et soojuse äraandmist võib arvestada ainult ühelt torult.

Vastus: $\alpha = 115,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

2.21. Vertikaalne aurutoru osa läbib tsehhi ruumi. Aurutoru välispinna temperatuur on $t_t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, ruumi temperatuur on $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Arvutada soojusvoo suurus, mis tuleb aurutoru pinnalt kui tema diameeter on $d = 150 \text{ mm}$.

Vastus: $626,4 \text{ W}$

2.22. Õliradiaatori paneeli pinna mõõdud on $h = 0,5 \text{ m}$ ja $l = 0,8 \text{ m}$, pinna temperatuur on $t_r = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Arvutage soojusäraandeteguri väärtus radiaatori töötavalt pinnalt kui ruumi temperatuur on $t_t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vastus: $\alpha = 5,71 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

2.23. Elektripliidi tööpinna mõõtmed on $b \times a = 0,6 \times 1 \text{ m}$. Temperatuur köögis on $t_k = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Leidke kui kõrgele tõuseb elektripliidi tööpinna temperatuur kui pärast sisselülitamist jääb ta

pikemaks ajaks „tegevuseta”(st temal ei hakata kohe toitu valmistama). Elektripliidi võimsus on 4,5 kW.

Vastus: $t_p = 685\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.24. Vee soojendamiseks auto väljalaskegaasidega on tuletõrje paakauto paaki monteeritud horisontaalne torustik välisdiameetriga $d = 65\text{ mm}$. Vee temperatuur paagis on $t_v = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, torude välispinna temperatuur on $t_t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Määrata soojuseäraandegur torude pinnalt veele ja soojusvoog, mille saab vesi kui torustiku pikkus on $l = 2\text{ m}$.

Vastus: $\alpha = 240,8\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $Q = 983\text{ W}$

2.25. Leida soojuskaod läbi kahekordse akna õhuvahe kui akna mõõdud on $b \times h = 1 \times 2\text{ m}$, õhuvahe on $\delta = 7\text{ cm}$, aknaklaaside temperatuur $t_{kl1} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $t_{kl2} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vastus: $Q = 91\text{ W}$

3. SOOJUSVAHETUS AURU KONDENSATSIOONIL

3.1. Määrata soojusvahetustegur kuiva küllastatud veeauru kondensatsioonil rõhul 4,85 ata terasest aurutorustiku sisepinnal, toru siseläbimõõt on 32 mm. Auru massikulu 0,1 kG / s.

Lahendus:

1. Küllastatud veeauru füüsikaliste parameetrite tabelist L 3 leiame küllastustemperatuuri $t_{küll} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja auru erikaalu $\gamma_{aur} = 2,547\text{ kG}/\text{m}^3$.

2. Küllastustemperatuuri alusel leiame vee füüsikaliste parameetrite tabelist L 4

$$\gamma = 917\text{ kG}/\text{m}^3; \lambda = 0,588\text{ kkal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}); \mu = 19 \cdot 10^{-6}\text{ (kG} \cdot \text{s)}/\text{m}^2; \text{Pr} = 1,17; \\ \nu = 0,203 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$$

3. Tsirkulatsiooni kiirus

$$\omega_{ts} = G_{\text{segu}} / (\rho_i \cdot F) = (4gG_{\text{segu}}) / (\gamma_f \cdot \pi \cdot d^2) = (4 \cdot 9,81 \cdot 0,1) / (917 \cdot 3,14 \cdot 0,032^2) = \\ = 1,33\text{ m/s}$$

4. Reynoldsi kriteerium

$$\text{Re} = (\omega_{ts} \cdot d) / \nu = [(1,33 \cdot 0,032) / 0,203] \cdot 10^6 = 2,11 \cdot 10^5$$

5. Nusselti kriteerium

$$\text{Nu} = C \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \cdot 0,5 \left[\sqrt{1 + x_1 \left[(\gamma / \gamma_{\text{aur}}) - 1 \right]} + \left[\sqrt{1 + x_2 \left[(\gamma / \gamma_{\text{aur}}) - 1 \right]} \right] \right] \\ \text{Terastorudel } C = 0,024; x_1 = 1; x_2 = 0 \text{ vastavalt ülesande tingimustele} \\ \text{Nu} = 0,024 (2,11 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 1,17^{0,43} \cdot 0,5 \left[\sqrt{1 + 1 \left[(917,0 / 2,547 - 1) \right]} + \sqrt{1} \right] = \\ = 4,44 \cdot 10^3$$

6. Soojusvahetustegur

$$\alpha = (Nu \cdot \lambda) / d = (4,44 \cdot 10^3 \cdot 0,588) / 0,032 = 8,16 \cdot 10^4 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

3.2. Leida tulekahju kustutamiseks vajalik auru hulk ruumis mõõtetmetega 12 x 6 x 6 m. Arvestuslik kustutamisaeg on 2 minutit. Keskmise ruumitemperatuur kustutamise arvestuslikul ajal on $t_f = 100^\circ\text{C}$. Ventileeritav gaasivahetus ruumis on $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Auru tuldkustutav kontsentratsioon on 30% (maht). Algtemperatuur on 20°C .

Lahendus:

1. Ehituskonstruksioonide pinnatemperatuur

$$t_w = 0,2 t_f + 0,00065 t_f^2 + t_0 = 0,2 \cdot 100 + 0,00065 \cdot 100^2 + 20 = 46^\circ\text{C}$$

2. Määratav temperatuur

$$t_m = 1/2 (t_{\text{küll}} + t_w) = 1/2 (70 + 46) = 58^\circ\text{C}, \text{ kus}$$

$t_{\text{küll}} = 70^\circ\text{C}$ vastavalt valemile: $d = 623 (p_p / p_k)$, kus p_p on veeauru partsiaalarõhk ja p_k on kuiva veeauru partsiaalarõhk

3. Kilekondensaadi ja auru füüsikalised parameetrid antud temperatuuril saame tabelitest L 3 ja L 4

$$c_p = 0,998 \text{ kkal} / (\text{kg} \cdot \text{deg}); \quad \lambda = 0,565 \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg});$$

$$\nu = 0,479 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \quad \gamma_{\text{aur}} = 0,598 \text{ kg}/\text{m}^3; \quad r = 539 \text{ kkal} / \text{kg}$$

$$\sigma = 68,3 \text{ kg}/\text{m}; \quad \gamma = 985,5 \text{ kg}/\text{m}^3; \quad \text{Pr} = 3,0; \quad \text{Pr} = \nu / \alpha$$

4. Nusselti kriteerium

a) vertikaalpindadele

$$\begin{aligned} Nu &= 0,943 (Gr \text{ Pr } K)^{0,25} = 0,943 [(g l^3 / \nu^2) \cdot (\nu / \alpha) \cdot r / (c_p \cdot \Delta t)]^{0,25} = \\ &= 0,943 [(9,81 \cdot 6^3) / (0,479)^2 \cdot 10^{12} \cdot 3,0 \cdot (539) / (0,998 \cdot 24)]^{0,25} = 26300 \end{aligned}$$

b) horisontaalpindadele

$$\begin{aligned} Nu &= 0,15 [(g l^3) / \nu^2 \cdot (\nu / \alpha) \cdot (1 - (\gamma_{\text{aur}} / \gamma)) \cdot r / (c_p \cdot \Delta t)]^{0,25} = \\ &= 0,15 [(9,81 \cdot 0,263^3) / (0,479)^2 \cdot 10^{12} \cdot 3 \cdot (1 - (598 / 985,5)) \cdot (539) / \\ &\quad / (0,998 \cdot 24)]^{0,25} = 404 \end{aligned}$$

Horisontaalpindasid iseloomustav joonmõõde

$$l' = [\sigma / (\gamma - \gamma_{\text{aur}})]^{0,5} = [68,3 / (985,5 - 0,598)]^{0,5} = 0,263 \text{ m}$$

5. Soojusvahetustegur

a) vertikaalpindadele

$$\alpha_{\text{vert}} = (N \cdot \lambda) / l = (26300 \cdot 0,565) / 6 = 2480 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

b) horisontaalpindadele

$$\alpha_{\text{hor}} = (Nu \cdot \lambda) / l' = (404 \cdot 0,565) / 0,263 = 870 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

6. Auru kondensatsioonil eraldunud soojushulk:

a) vertikaalpindadel

$$Q_{\text{vert}} = \alpha_{\text{vert}} \cdot F_{\text{vert}} (t_{\text{küll}} - t_{\text{õ}}) = 2480 (2 \cdot 12 + 2 \cdot 6) \cdot 6 \cdot (70 - 46) = 1,28 \cdot 10^7 \text{ kkal/h}$$

b) horisontaalpindadel

$$Q_{\text{hor}} = \alpha_{\text{hor}} \cdot F_{\text{vert}} (t_{\text{küll}} - t_{\text{õ}}) = 870 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 2 (70 - 46) = 3,0 \cdot 10^6 \text{ kkal/h}$$

7. Auru kulu kondensatsioonil

a) vertikaalpindadel

$$G_{\text{vert}} = Q_{\text{vert}} / r = (1,28 \cdot 10^7) / 539 = 2,37 \cdot 10^4 \text{ kG/h}$$

b) horisontaalpindadel

$$G_{\text{hor}} = Q_{\text{hor}} / r = (3 \cdot 10^6) / 539 = 5,56 \cdot 10^3 \text{ kG/h}$$

Summaarne aurude hulk kondensatsioonil

$$G_o = G_{\text{vert}} + G_{\text{hor}} = 2,37 \cdot 10^4 + 5,56 \cdot 10^3 = 2,926 \cdot 10^4 \text{ kG/h}$$

või

$$G_o = 489 \text{ kG/min}$$

8. Gaaside maht V, milles on vaja luua tuldkustutav kontsentratsioon

$$V = V_{\text{ruum}} + V_{\text{gvah}} = 12 \cdot 6 \cdot 6 + (1000 / 60) \cdot 2 = 455 \text{ m}^3$$

kus V_{ruum} – ruumi maht,

V_{gvah} – gaasivahetus 2 minuti jooksul

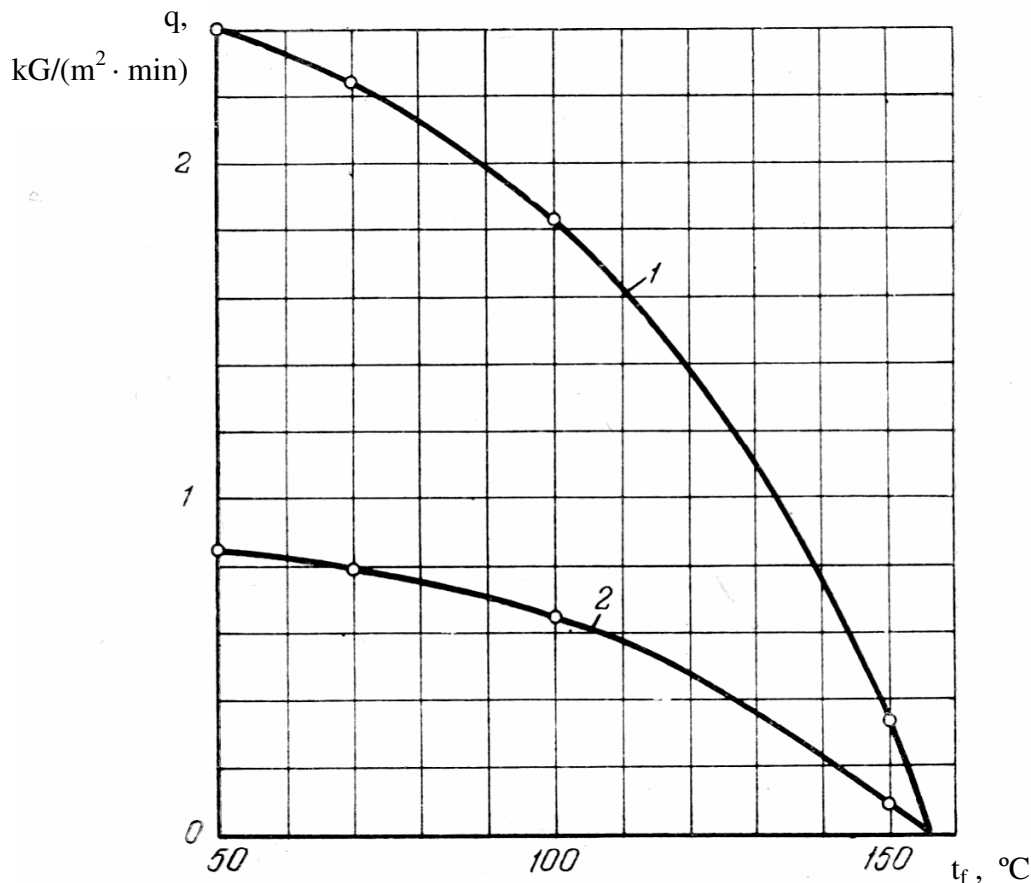
9. Auru hulk, mis on vaja tuldkustutava kontsentratsiooni loomiseks arvestamata aurude kondensatsiooni:

$$G_k = (0,3 V \cdot \gamma_{\text{aur}}) / \tau_p = (0,3 \cdot 455 \cdot 0,598) / 2 = 40,8 \text{ kG/min}$$

10. Kui mitu korda on vaja suurendada aurude hulka tuldkustutava kontsentratsiooni loomiseks arvestades kondensatsiooniga

$$n = G_o / G_k = 489 / 40,8 = 12 \text{ korda}$$

Ülesannet saab lahendada kiiremini graafikut kasutades (joonis 3.1).



Joonis 3.1. Kondenseeruva veeauru hulga olenevus $q = f(t_f)$ (auru kulu) keskkonna temperatuurist. 1 – vertikaalpind; 2 - horisontaalpind

1 m² vertikaalpinnal ja horisontaalpinnal (kõrgus 6 m) kondenseerunud veeauru hulga olenevus keskkonna keskmisest mahulisest temperatuurist tuginedes järgnevatele 3 võrrandile. 6 meetrit on tavaline tööstushoone ruumi kõrgus. Kõrguse muutusel piires 3-12 m muutub kondensatsiooni hulk tavaliselt 10%, kusjuures kõrguse vähenedes ta kasvab.

Kondensaadi G kulu määratakse valemiga

$$G = \sum Q / r, \text{ kG/h,}$$

kus $\sum Q = Q_{\text{vert}} + Q_{\text{hor}}$ – auru kondensatsioonil eraldunud soojushulk vertikaal- ja horisontaalpindadel [kkal / h]

$$Q_{\text{vert}} = \alpha_{\text{vert}} + F_{\text{vert}} (t_{\text{küll}} - t_{\omega}); \quad Q_{\text{hor}} = \alpha_{\text{hor}} + F_{\text{hor}} (t_{\text{küll}} - t_{\omega}),$$

kus α_{vert} – soojusvahetustegur vertikaalpindadel,

α_{hor} – soojusvahetustegur horisontaalpindadel,

F_{vert} ja F_{hor} – vertikaal- ja horisontaalpindade suurus, m²

$t_{\text{küll}}$ – küllastustemperatuur, °C

t_{ω} – ehituskonstruktsioonide ja seadmete välispinna temperatuur, °C

Auru küllastustemperatuur segus õhuga on võrdne niiske õhu kastepunktiga, mille saab leida õhu ja veeauru segu füüsikaliste omaduste tabelist.

Auru 30% (maht) kontsentratsioonile vastab veeauru partsiaalarõhk $p_{\text{kond}} = 0,3$ ata ja kuiva veeauru partsiaalarõhk 0,7 ata.

Sellistel tingimustel on õhu niiskusesisaldus

$$d = 623 (p_{\text{am}} / p_{\text{õhk}}) \text{ järgi } 267 \text{ G / kG, millele vastab kastepunkt } 70^{\circ}\text{C.}$$

Ehituskonstruksioonide ja seadmete välispinna temperatuuri t_w leitakse mittestatsionaarse soojusjuhtivuse võrrandite järgi. Katseandmete põhjal on leitud, et ligilähedaselt võib selle temperatuuri arvutada järgneva valemi järgi:

$$t_w = 0,2 t_f + 0,00065 t_f^2 + t_o ,$$

kus t_f – on keskkonna keskmine mahuline temperatuur, °C.

t_o – on algtemperatuur, °C.

Jooniselt 3.1 nähtub, et ehituskonstruksioonide ja seadmete pinnatemperatuur ületab põlemissaaduste kastepunkti ainult keskkonna temperatuuril 166 °C ja üle selle. Arvutused näitavad, et temperatuuri $t_f < 100^\circ\text{C}$ puhul on pindadel kondenseeruva auru hulk mitu korda suurem (kondensatsiooni arvestamata) nõutavast tuldkustutavast auruhulgast.

Seda tuleb arvestada auruga kustutamissüsteemide projekteerimisel.

3.3. Leida kondenseerunud auru hulk vertikaalsel pinnal kõrgusega 3 m ja laiusega 6 m. Kondenseerub kuiv küllastatud aur, mille rõhk on 101,3 kPa. Seinatemperatuur on 25 °C. Tegemist on kilekondensatsiooniga, kondensaadi kile voolamine on laminaarne.

Vastus: $M = 4,27 \text{ kg/s}$

3.4. Vertikaalse toru pinnal toimub kuiva küllastatud veeauru, mille rõhk on 47,36 kPa kondensatsioon. Toru kõrgus on 2 m, välisläbimõõt 0,05 m ja pinna temperatuur 343 K. Määrata auru poolt antav soojusvoog ja 1 tunni jooksul kondenseerunud auru hulk. Tegemist on kilekondensatsiooniga, kile voolamine on laminaarne.

Vastus: $Q = 22487 \text{ W}$ ja $M = 35 \text{ kg/h}$

3.5. Vertikaalsel teraslehel kõrgusega 1,4 m kondenseerub aur, mille liikumiskiirus on 10 m/s ja rõhk 0,361 Pa. Teraslehe pinna temperatuur on 343 K. Määrata teraslehe 1,0 m laiusel pinnal kondenseerunud auru hulk. Tegemist on kilekondensatsiooniga, kondensaadi kile voolamine on laminaarne.

Vastus: $M = 0,146 \text{ kg/s}$

3.6. Määrata soojusäraandegur kuiva küllastatud auru kondensatsioonil horisontaalsel 0,02 m diameetriga toru pinnal, auru temperatuur on 120 °C, toru pinna temperatuur hoitakse 75 °C juures. Auru liikumiskiirus on 3 m/s. Tegemist on kilekondensatsiooniga, kile voolamine on laminaarne.

Vastus: $\alpha = 8329 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

3.7. 0,02 m diameetriga toru välispinnal kondenseerub 30 g/s kuiv küllastunud aur, rõhul $p = 0,07 \text{ MPa}$. Toru pinna temperatuur on 50 °C. Leida kondensatsiooni pindala ja toru pikkus. Tegemist on kilekondensatsiooniga, kile voolamine on laminaarne. Auru liikumiskiirusega 5 m/s.

Vastus: $F = 0,223 \text{ m}^2$ ja $l = 3,55 \text{ m}$

3.8. Horisontaalsel 2 m pikkusega ja 0,03 m diameetriga torul kondenseerub kuiv küllastatud aur, mille rõhk on 0,17 MPa. Auru liikumatu. Tegemist on kilekondensatsiooniga, kile

voolamine on laminaarne. Toru pinna temperatuur on 353 K. Leida millise aja vältel kondenseerub 10 kg auru.

Vastus: $\tau = 395 \text{ s}$

3.9. Ruumi laes kondenseerub aur, mille rõhk on 0,198 MPa. Lae pinna temperatuur on 30 °C. Arvutage pinna soojusäraandetegur.

Vastus: $\alpha = 1800 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

3.10. Määrata auruga töötava tulekustutusseadme auru kulu ruumis mõõtmetega $a \times b \times h = 3 \times 2 \times 2 \text{ m}$. Tule kustutamise arvestuslik aeg on 2 minutit. Piirete pinna temperatuur on 40 °C. Tulekahju kustutamisel kasutatakse kuiva küllastatud auru, mille rõhk on 0,12 MPa. Ruumi õhuvahetus on ühekordne ($12 \text{ m}^3/\text{h}$). Arvestuslik auru kustutamiskontsentratsioon on 30% (maht).

Vastus: $G = 3,115 \text{ kg/s}$

3.11. Määrata auruga töötava tulekustutusseadme auru hulk kuivatuskambrile mõõtmetega $3 \times 1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ (kõrgus). Kuivati hoitakse temperatuur 95 °C juures. Tulekahju kustutamisel kasutatakse kuiva küllastatud auru rõhu 0,101 MPa juures. Kuivati ventilatsiooniseadme tootlikkus on $1500 \text{ m}^3/\text{h}$. Arvestuslik auru kustutamiskontsentratsioon on 30% (maht). Kustutamise arvestuslik aeg on 2 minutit.

Vastus: $M = 0,74 \text{ kg/s}$ (sellest 0,46 kg/s kondenseerub)

4. SOOJUSVAHETUS VEDELIKE KEEMISEL

4.1. Määrata soojusvahetustegur ja soojusvoo tihedus vee keemisel suuremahulise loomuliku konveksiooni tingimustes. Küllastusrõhk $p_{\text{küll}} = 4,85 \text{ ata}$, seina temperatuur $t_w = 160 \text{ °C}$.

Lahendus:

1. Tabelist L 3 leiame küllastustemperatuuri $t_{\text{küll}} = 150 \text{ °C}$.

2. Soojusvahetustegur

$$\begin{aligned}\alpha &= 39 (t_w - t_{\text{küll}})^{2,33} \cdot p_{\text{küll}}^{0,5} = 39 (160 - 150)^{2,33} \cdot 4,85^{0,5} = \\ &= 39 \cdot 214 \cdot 2,2 = 18\,300 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})\end{aligned}$$

3. Soojusvoo tihedus

$$\begin{aligned}q &= \alpha (t_w - t_{\text{küll}}) = 18\,300 (160 - 150) = 1,83 \cdot 10^5 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}) ; \\ q &< q_{\text{krit}} = (1,2 \div 1,3) \cdot 10^6 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})\end{aligned}$$

4.2. Määrata terasest paagi seina temperatuur, kui selles keeb benseen loomuliku konveksiooni tingimustes küllastusrõhul $p_{\text{küll}} = 3 \text{ ata}$. Paagi kuumutavad tulekahju põlemisgaasid soojusvoo

tihedusel $q = 1,6 \cdot 10^5 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h)}$. Paagi seina paksus $\delta = 1 \text{ cm}$, soojusjuhtivustegur $\lambda = 40 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$.

Lahendus:

1. Soojusvahetustegur benseeni keemisel on

$$\alpha = C \cdot q^{0,7} \cdot p_{\text{küll}}^{0,4} = 0,8 (1,6 \cdot 10^5)^{0,7} \cdot 3^{0,4} = 0,8 \cdot 4470 \cdot 1,55 = 5550 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$$

$C = 0,8$ tabeli 4.1 põhjal

Tabel 4.1. Tegur C väärtused mõnedel vedelikel

Vedelik	C	Vedelik	C
Petrooleum	0,8...1,45	Etanool	1,17
Bensiin	0,7	Metanool	0,935
Benseen	0,8	Heptaan	1,2

2. Benseeniga kokkupuutuva paagi siseseina temperatuur

$$t_{\omega 2} = t_{\text{küll}} + (q / \alpha) = 120 + (1,6 \cdot 10^5) / (5,55 \cdot 10^3) = 149 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{küll}} = 120 \text{ }^\circ\text{C (benseeni füüsikaliste parameetrite tabelist)}$$

3. Põlemisgaasidega kokkupuutuva paagi välisseinatemperatuur

$$t_{\omega 1} = t_{\omega 2} + (q \delta) / \lambda = 149 + (1,6 \cdot 10^5 \cdot 0,01) / 40 = 189 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kasutades tugevusõpetuse võrrandeid, saame hinnata seinte kandetugevust ja nende võimalikku purunemist.

4.3. Määrata terastoru ($d_1/d_2 = 50/53 \text{ mm}$) seina temperatuuri muutus, kui torus toimub soojuskandja (difenuülsugu) mullkeemis režiimilt üleminek kilekeemis režiimile, Küllastusrõhk on $p_{\text{küll}} = 2 \text{ ata}$. Toru kuumutatakse leegiga, mille temperatuur on $t_f = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$. Soojusvahetustegur leegilt toru seinale on $\alpha_1 = 300 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$.

Lahendus:

1. Soojuskandja füüsikalised parameetrid leiame ainete soojusfüüsikaliste suuruste tabelist küllastusrõhul $p_{\text{küll}} = 2 \text{ ata}$.

$$t_{\text{küll}} = 290^\circ\text{C}; \lambda = 0,084 \text{ kkal / (m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}; \gamma = 835 \text{ kG/m}^3;$$

$$Q = 85 \text{ (kG} \cdot \text{s}^2) / \text{m}^4; r = 64,5 \text{ kkal / kG}; c_p = 0,65 \text{ kkal / (kG} \cdot \text{deg)};$$

$$\sigma = 14 \cdot 10^{-4} \text{ kG / m}; Q_{\text{kile}} = 0,735 \text{ (kG} \cdot \text{s}^2) / \text{m}; Pr = 6,7;$$

$$v = 0,287 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; p_{\text{krit}} = 41 \text{ ata}; \gamma_{\text{kile}} = 7,2 \text{ kG/m}^3.$$

2. Soojusvoo kriitiline tiheus:

$$q_{\text{krit}} = k_{1r} \sqrt{\gamma_{\text{kile}} \cdot g (1 + (\gamma_{\text{kile}} / \gamma))} \cdot \sqrt[4]{\sigma (\gamma - \gamma_{\text{kile}})} =$$

$$= (0,12 \dots 0,156) \cdot 64,5 \sqrt{7,2 \cdot 9,81 (1 + (7,2/835))} \cdot \sqrt[4]{14 \cdot 10^{-4} (835 - 7,2)} =$$

$$= (0,252 \dots 0,325) \cdot 10^6 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h)}.$$

Võrrandite

$$(1) \quad q_{\text{krit}} \cdot 10^{-6} = [0,1 + 0,115 (r/100)^{0,133}] p_{\text{küll}}^{0,25} \quad \text{ja}$$

$$(2) \quad q_{\text{krit}} \cdot 10^{-6} = [0,18 + 0,115 (r/100)^{0,133}] p_{\text{küll}}^{0,25} \quad \text{järgi}$$

$$\text{on } q_{\text{krit}} = (0,247 \dots 0,342) \cdot 10^6 \text{ kkal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}).$$

Võrrandi

$$(3) \quad q_{\text{krit}} / q_{\text{krit maks}} = 1,32 (p/p_{\text{krit}})^{0,25} \quad \text{järgi}$$

$$\begin{aligned} \text{on } q_{\text{krit}} &= q_{\text{krit maks}} \cdot [1,32 (p_{\text{küll}} / p_{\text{krit}})^{0,25} = (1,6 p_{\text{krit}} - 18) \cdot 10^4 \cdot 1,32 (p_{\text{küll}} / p_{\text{krit}})^{0,25} = \\ &= (1,6 \cdot 41 - 18) \cdot 10^4 \cdot 1,32 (2 / 41)^{0,25} = 0,293 \cdot 10^4 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}). \end{aligned}$$

Leitud q_{krit} arvuline väärtus eeltoodud võrrandi (3) alusel vastab tema arvutatud väärtusele p 2 toodud võrrandi ning võrrandite (1) ja (2) järgi tingimusel:

$$k \approx (0,12 + 0,156) / 2 = 0,138$$

k (k_1) on ühikuta suurus, mille arv väärtus on piires $0,12 < k_1 < 0,156$.

Soojustehniliste seadmete projektide puhul tuletõrje tehnilises ekspertiisis tuleb k_1 väärtuseks võtta väiksem arv väärtus, avariide ning plahvatuste ekspertiisis aga suurem arv väärtus.

Järgnevat arvutustes võtame

$$q_{\text{krit}} = 0,293 \cdot 10^6 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}).$$

3. Soojusvahetustegur seina ja keeva vedeliku vahel mullkeemise režiimil:

$$\alpha_2 = (\text{Nu}^* \cdot \lambda) / l^*; \quad \text{Nu}^* = C \text{Re}^n \text{Pr}^{1/3}; \quad \text{Re}^* = \omega_k \cdot l^* / \nu.$$

Auru tinglik kiirus:

$$\omega_k = q_{\text{krit}} / r \cdot \rho_{\text{mull}} = (2,93 \cdot 10^5) / (64,5 \cdot 0,735 \cdot 3600) = 1,72 \text{ m/s}$$

Iseloomustav joonmõõde:

$$\begin{aligned} l^* &= (C \cdot q \cdot \sigma \cdot T_{\text{küll}} A) / (r q_{\text{küll}})^2 = (0,65 \cdot 85 \cdot 14 \cdot 10^{-4} \cdot 563) / [(64,5 \cdot 0,735)^2 \cdot 427] = \\ &= 4,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}, \end{aligned}$$

kus $A = 1 / 427 \text{ kkal/kGm}$ – töö soojusekvivalent

Reinoldsi kriteerium:

$$\text{Re}^* = (1,72 \cdot 4,54 \cdot 10^{-5}) / (0,287 \cdot 10^{-6}) = 259 > 0,01; \quad C = 0,125; \quad n = 0,65$$

Nusselti kriteerium

$$\text{Nu}^* = 0,125 \cdot 259^{0,65} \cdot 6,7^{0,333} = 0,125 \cdot 37,5 \cdot 1,88 = 8,8$$

Soojusvahetustegur

$$\alpha_2 = (8,8 \cdot 0,084) / 4,54 \cdot 10^{-5} = 1,63 \cdot 10^4 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}),$$

4. Keeva vedeliku poolt mõjutatav siseseina temperatuur

$$t_{w2} = t_{\text{küll}} + (q_{\text{krit}} / \alpha_2) = 290 + [(2,93 \cdot 10^5) / 1,63 \cdot 10^4] = 308 \text{ }^\circ\text{C}$$

5. Leegi poolse välisseina temperatuur

$$t_{w2} = t_f - (q_{\text{krit}} / \alpha_1) = 1400 - (2,93 \cdot 10^5) / (3 \cdot 10^2) = 423 \text{ }^\circ\text{C}$$

6. Soojusvahetustegur α_2' seinä ja auru vahel kilekeemise režiimil

$$\alpha_2 = (\text{Nu}_m \cdot \lambda) / l ; \text{Nu}_m = C(\text{GrPr})_m^{1/3}$$

Difenüülsegu auru füüsikalised parameetrid teatmekirjanduses puuduvad. Arvestame sellega, et piirkihi kriitilise oleku vahetus läheduses on tema füüsikalised parameetrid lähedasemad rohkem vedelikule kui aurule.

Võtame esimesel lähendusel füüsikalised parameetrid samadeks kui on vedelikul tema küllastuskõveral.

Kriteeriumide Gr ja Pr korrutis:

$$\begin{aligned} \text{Gr} \cdot \text{Pr} &= [g (Q - Q_{\text{kile}}) l^3 \text{Pr}] / \nu^2 = [9,81 (85 - 0,755) \cdot 0,053 \cdot 6,7] / (0,287 \cdot 10^{-6})^2 = \\ &= 8,35 \cdot 10^8 > 2 \cdot 10^7 \end{aligned}$$

Siit järeldub, et tegemist on turbulentse liikumisrežiimiga piirkihis. Sellistel tingimustel (kilekeemis režiim, aurukile turbulentne liikumine) annab usaldusväärsema vastuse valem:

$$\text{Nu}_m = C (\text{GrPr})_m^{1/3}$$

Nusselti kriteerium

$$\text{Nu}_m = 0,25 (8,35 \cdot 10^8)^{1/3} = 235$$

Soojusvahetustegur $\alpha_2' = (235 \cdot 0,084) / 0,05 = 396 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$.

7. Keeva vedeliku poolse seinä temperatuur:

$$t'_{w2} = t_{\text{küll}} + (q_{\text{krit}} / \alpha_2') = (290 + 2,93 \cdot 10^5) / 396 = 1030 \text{ }^\circ\text{C}$$

8. Leegi poolse seinä temperatuur:

$$t'_{w1} = t'_{w2} + (q_{\text{krit}} \cdot \delta) / \lambda = 1030 + (2,93 \cdot 10^5 \cdot 0,0015) / 40 = 1041 \text{ }^\circ\text{C}$$

Seinä temperatuur piires 1030 kuni 1041 $^\circ\text{C}$ on kõrgem terase voolavuse temperatuurist, järelikult on seinä purunemine vältimatu.

See näide näitab kujukalt, kuivõrd ohtlik on vedelike keemisprotsessi viia läbi kriitilise punkti lähedal.

4.4. Leida soojusäraandetegur etüülalkoholi mullkeemisel vaba konvektsiooni piires. Keemine toimub rõhul 0,101 MPa. Küttepinna soojusvoo tihedus $5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$

Vastus: $7888 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

4.5. Arvutage etüülalkoholi keemisel kriitiline soojusvoo tihedus. Keemine toimub rõhul 0,101 MPa, küllastustemperatuur on 78,3 $^\circ\text{C}$, tihedus 737 kg/m^3 , auru tihedus $1,58 \text{ kg/m}^3$, vedeliku soojusmahtuvus $3,3 \text{ kJ/kg}$, vedeliku dünaamiline viskoossus $46 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, pindpinevustegur $0,017 \text{ N/m}$.

Vastus: $q_{\text{krit}} = 481576 \text{ W/m}^2$

4.6. Leida soojusäraandetegur ja küttepinna temperatuur benseeni suuremahulisel mullkeemisel vaba liikumise piires. Keemine toimub rõhul 0,2 MPa, soojusvoo tihedus küttepinna $5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$. Küllastustemperatuur antud rõhul on $T_{\text{küll}} = 377,13 \text{ K}$. Arvutustel kasutada kriitilist rõhku ja temperatuuri.

Vastus: $\alpha = 8238 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $T_{\text{kp}} = 383 \text{ K}$

4.7. Toimub suuremahuline arenenud metüülalkoholi mullkeemine rõhul 0,27 MPa (küllastustemperatuur on 365 K). Küttepinna soojuskoormus on $5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$. Leida soojusäraandegur ja küttepinna temperatuur.

Vastus: $\alpha = 12650 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $T_{\text{kp}} = 369 \text{ K}$

4.8. Leida soojusäraandegur, temperatuuride vahe ja küttepinna temperatuur vee suuremahulisel mullkeemisel. Küttepinna soojusvoo tihedus on $q = 3 \cdot 10^5 \text{ W} / \text{m}^2$. Rõhk keedunõus on 0,361 MPa. Soojusäraandegur leida spetsiaalselt vee jaoks saadud valemi järgi.

Vastus: $\alpha = 22959 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $\Delta T = 13 \text{ K}$; $T_{\text{kp.}} = 426 \text{ K}$

5. KIIRGUSOOJUSVAHETUS

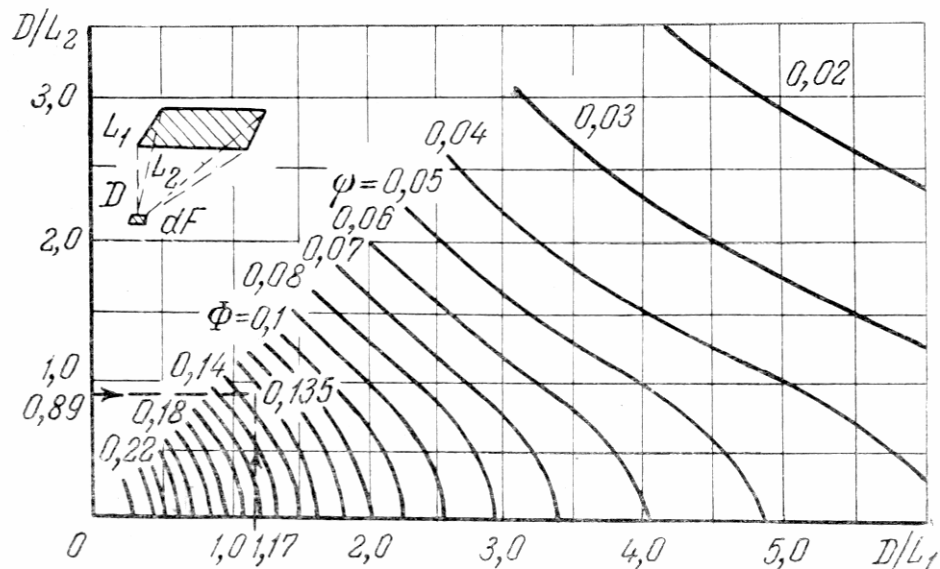
5.1. Määrata välisvoodrita malmahju ja männipuust seinahüütu vahekaugus (vaba ruumi alas) kui soojust kiirgava pinna suurus on $0,446 \times 0,7 \text{ m}$ ja malmahju seinatemperatuur on 915°C . Ohutusteguriks on võetud 1,5 arvestusega, et malmahju ja seinahüütu vahelise vaba ruumi üle ei ole pidevat kontrolli.

Lahendus:

1. Jagame soojustkiirgava pinna neljaks ühesuguseks ristkülikuks, mille igahüü küljepikkused on võrdsed $L_1 = 0,223$, $L_2 = 0,35$ ja andes vahekaugused seinani 0,25; 0,5; 0,75; 1 ja 1,05 m, arvutades suurused D_i / L_1 ja D_i / L_2

$D_1 / L_1 = 0,25 / 0,223 = 1,12$;	$D_1 / L_2 = 0,25 / 0,35 = 0,714$
$D_2 / L_1 = 0,5 / 0,223 = 2,24$;	$D_2 / L_2 = 0,5 / 0,35 = 1,428$
$D_3 / L_1 = 0,75 / 0,223 = 3,36$;	$D_3 / L_2 = 0,75 / 0,35 = 2,142$
$D_4 / L_1 = 1 / 0,223 = 4,48$;	$D_4 / L_2 = 1 / 0,35 = 2,856$
$D_5 / L_1 = 1,05 / 0,223 = 4,93$;	$D_5 / L_2 = 1,05 / 0,35 = 3,14$

Järgneva nomogrammi (joonis 5.1) alusel olenevalt arvutatud väärtuste D_i / L_1 ja D_i / L_2 põhjal leiame elementaaristikülikutele kiiritustegurid ja korrutades neid 4-ga, saame $\psi_{1,2}$ väärtuse kõikidele kiirgavatele pindadele



Joonis 5.1. Täisnurkse kujuga $\frac{1}{4}$ leegi nurkkiirgusteguri määramise nomogramm

$$\begin{aligned}
 \psi'_{1,2} &= 0,15; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,15 = 0,6 \\
 \psi'_{1,2} &= 0,07; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,07 = 0,28 \\
 \psi'_{1,2} &= 0,038; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,038 = 0,152 \\
 \psi'_{1,2} &= 0,023; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,023 = 0,092 \\
 \psi'_{1,2} &= 0,0219; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,0219 = 0,0876
 \end{aligned}$$

Tuletatud mustusastme leiame valemi $\varepsilon_{tul} = \varepsilon_1 \varepsilon_2$ järgi, võttes lisas toodud tabeli L 6 alusel $\varepsilon_1 = 0,95$ (karedapinnaline oksüdeeritud malm) ja $\varepsilon_2 = 0,09$ (männipuit)

$$\varepsilon_{tul} = 0,95 \cdot 0,9 = 0,855$$

Võttes tabelist 5.1 kriitilise soojusvoo väärtuse männipuidule

$$q_{krit} = 11000 \text{ kkal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg ning asetades selle valemisse}$$

$$T_2 = 100 \sqrt{(T_1/100)^4 - q_{krit} / (\beta C_0 \cdot \varepsilon_{tul} \cdot \varphi_{1,2})} \leq T_{isesütt}$$

Leiame võimaliku temperatuuri $\beta = 1,5$ korral.

Tulemused on koondatud tabelisse 5.2:

Tabel 5.1. Mõnede põlevmaterjalide kriitiline soojusvoog ja kriitiline temperatuur

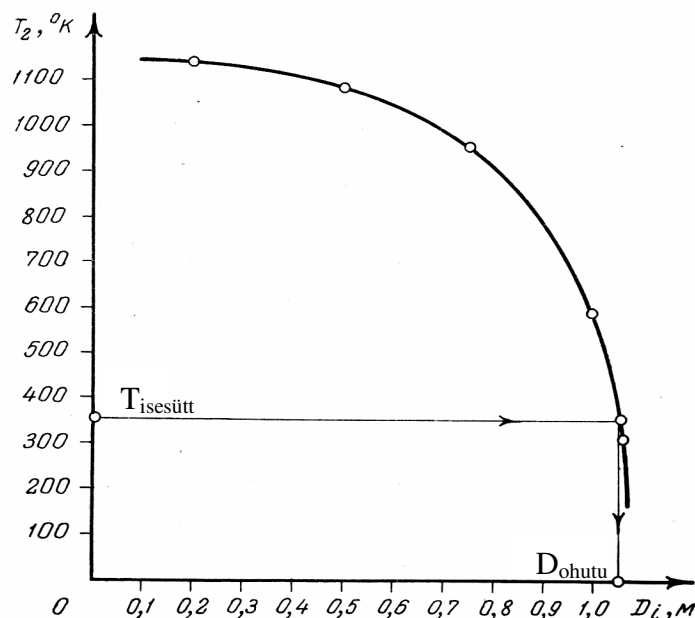
Materjali nimetus	Lubatud kuumutamistemperatuur (isesüttimistemperatuur), K	Kriitiline soojusvoog, kkal/(m ² h) – kW /m ²
Puuvillakiud	393	6 420 – 7,46
Tükiturvas	353	8 400 – 9,77
Hall kartong	373	9 300 – 10,81
Hööveldamata männipuit	353	11 000 – 12,79
Turbabrikett	353	11 400 – 13,26
Kihiline plast (getinaks- tüüpi)	393	13 200 – 15,35
Klaasplastik(polüetrite baasil)	373	13 200 – 15,35

Õlivärviga kaetud männipuit	353	15 000 – 17,44
Pergamiin	393	15 000 – 17,44

Tabel 5.2. Arvutuste tulemused

T_1, K	D_i, m	$\psi_{1,2}$	ε_{tul}	$q_{krit}, kkal / (m^2 \cdot h)$	β	T_2, K
1188	0,25	0,60	0,855	11000	1,5	1135
1188	0,50	0,28	0,855	11000	1,5	1090
1188	0,75	0,152	0,855	11000	1,5	960
1188	1,0	0,092	0,855	11000	1,5	589
1188	1,05	0,0876	0,855	11000	1,5	316

Tabelis toodud andmete alusel joonistame graafiku $T_2 = f(D_i)$



Joonis 5.2. Metallahju kõrval oleva vaba ruumi mõõtmete määramise graafik $T_2 = f(D_i)$

Võttes tabelist 5.1 $T_{isesütt} = 353 K$ ning märkides selle graafikule saamegi ohutu vahekauguse $D_{ohutu} \approx 1,05 m$.

Ehitusnormides on välisvoodrita metallahjude puhul ohutuks vahekauguseks 1 m kohustusliku 25 mm paksuse krohvikihiga põlevmaterjalist seinal. Arvestatud on sellega, et kiirgav pind võib olla suurem ja kiirgava pinna temperatuur võib olla kõrgem kui ülesandes toodud.

5.2. Määrata statsionaarse pidevalt köetava tellistest suure soojusmahtuvusega ahju ja hõõveldatud puitseina vaheline ohutu kaugus (õhkvahe) kui kiirgava pinna suurus on $F_1 = 0,8 \cdot 2,4 m$ ja seina paksus $\delta = 0,125 m$. Seina materjali soojusjuhtivustegur $= 0,625 kkal / m \cdot h \cdot deg$. Temperatuur ahju sees $700 ^\circ C$. Ahju krohvitud pinna mustusaste $\varepsilon_1 = 0,91$ ja puitseinal $\varepsilon_2 = 0,85$ (tabel L 6). Ohutustegur $\beta = 1,5$ (arvestatud samadel asjaoludel kui eelmises ülesandes).

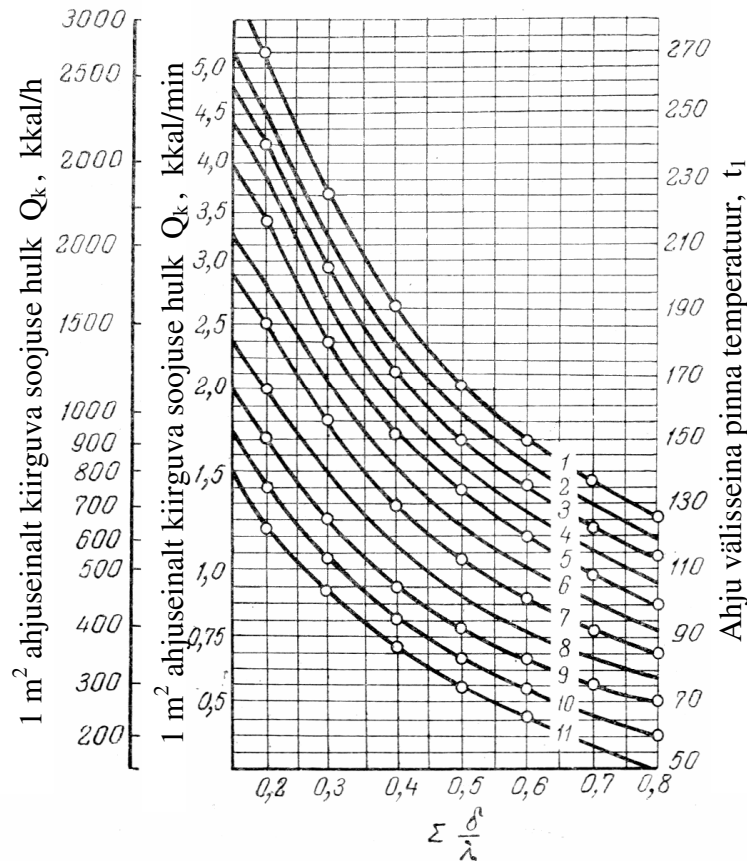
Lahendus:

1. Leiame seina termilise takistuse:

$$\delta/\lambda = 0,125/0,625 = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg} / \text{kkal}$$

Joonise 5.3 järgi leiame pliidi sisetemperatuuri 700 °C järgi

$$q_{\text{kiirgus}} = 1125 \text{ kkal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \text{ ja seina välistemperatuuri } t_1 = 165^\circ\text{C}$$



Joonis 5.3. Ahju seina kiirgus

$$\text{Valem } \bar{l} = D(b+h) / 2b \cdot h,$$

kus \bar{l} – on suhteline vahekaugus, [m]

D – vahemaa kiirgava ja kiiritatava pinna vahel, [m]

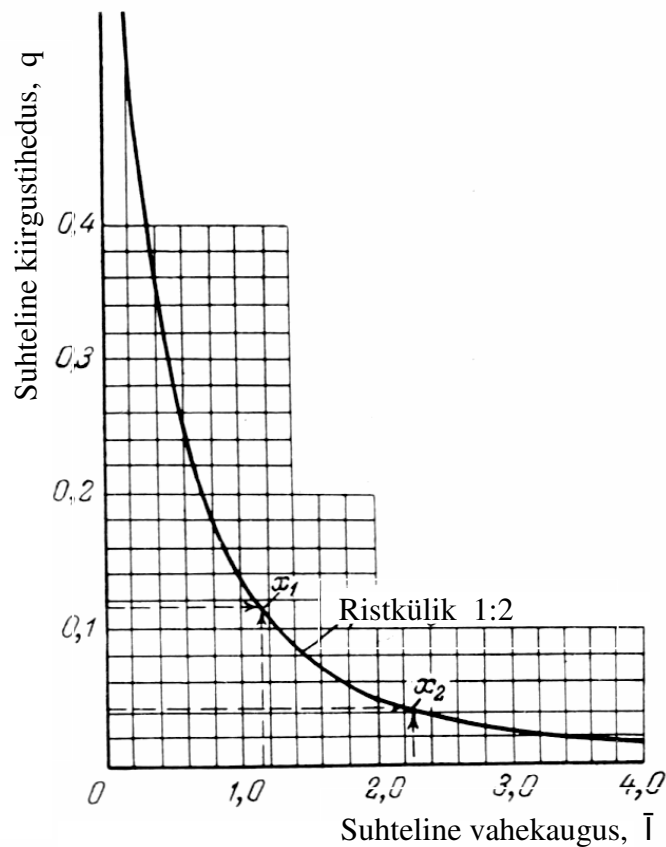
b, h – kiirgava pinna mõõtmed, [m]

Võtame järgmised vahekaugused 10, 20 ja 30 cm ning kasutades eeltoodud **valemit**, arvutame:

$$\bar{l}_1 = 0,1 (0,8 + 2,4) / (2 \cdot 8 \cdot 2,4) = 0,1 \cdot 0,385 = 0,0385;$$

$$\bar{l}_2 = 0,2 \cdot 0,385 = 0,077;$$

$$\bar{l}_3 = 0,3 \cdot 0,385 = 0,1155.$$



Joonis 5.4. Kiirguse suhteline tihedus olenevalt vahekaugusest kiirgusallikani

Ekstrapoleerides graafikut (joonis 5.4) väärtuseni $q = 1$, saame $q_1 = 1$; $q_2 = 0,61$; $q_3 = 0,45$

Arvestades ohuteguriga $\beta = 1,5$ saame:

$$\beta q_{a1} = 1,5 \cdot 1 \cdot 1125 = 1\,690 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$\beta q_{a2} = 1,5 \cdot 0,61 \cdot 1125 = 1\,030 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$\beta q_{a3} = 1,5 \cdot 0,45 \cdot 1125 = 760 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

Arvestades valemiga:

$$\beta q_{\omega} \leq q_{\text{oh}} = C_0 \cdot \varepsilon_{\text{tul}} [(T_1 / 100)^4 - (T_{\text{sein}} / 100)^4]$$

leiame antud tingimustel puitseinalle ohtliku soojuskiirguse tiheduse:

$$q_{\text{oh}} = 4,96 \cdot 0,784 [(165+273 / 100)^4 - (353 / 100)^4] = 832 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

kus $\varepsilon_{\text{tul}} = 1 / [(1/0,91) + (1/0,85) - 1] = 0,784$

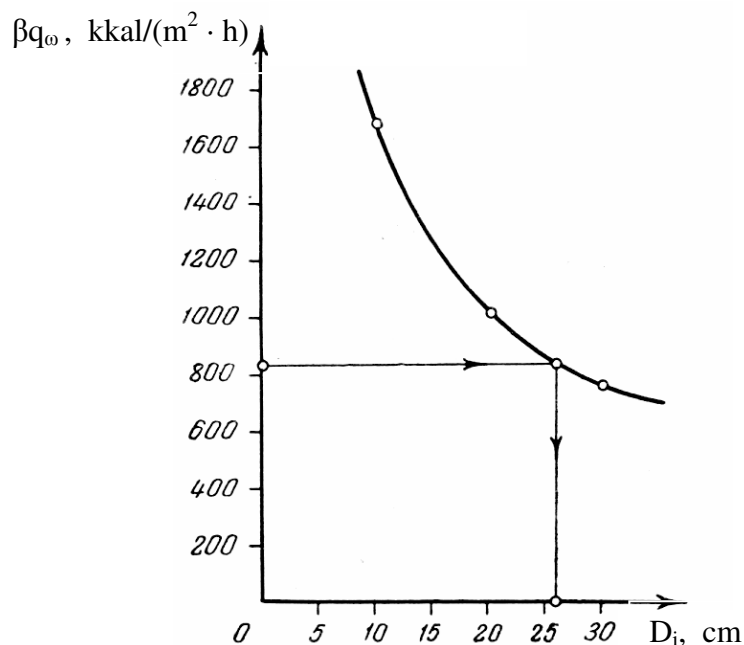
valemi $\varepsilon_{\text{tul}} = 1 / [(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1]$ järgi

$T_{\text{sein}} = 353 \text{ K}$ on võetud tabelist 5.1 (männipuit)

Arvutatud q_{ω} tulemuste järgi joonestame graafiku $\beta q_{\omega} = f(D_i)$ (joonis 5.5), kus märgime

$$q_{\text{oh}} = 832 \text{ kkal} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$$

ja leiame ohutu vahekauguse 26 cm.



Joonis 5.5. Graafik $\beta q_\omega = f(D_i)$ ahju kõrval oleva ohutu ala leidmiseks

Tuleohutuse seisukohalt on selline vahekaugus lubatud 3 tunnilise ahju kütmise juures tingimusel, et põlevast materjalist sein (siin hõõveldatud värvitud männilauast sein) oleks kaetud soojusisolatsiooni materjaliga.

5.3. Määrata soojusisolatsiooni plaatide(turbapressplaat) (100 x 100 x 3 cm) kuivatamise tingimused tuleohutuse seisukohalt.

Lahendus:

Tabelist 5.3 saame isolatsiooniplaatidele $A = 1,76$; $a = 0,248$; $B = 2,271$; $b = 0,1171$; $t_{ise} = 80^\circ\text{C}$; $t_{hõõg} = 187^\circ\text{C}$.

Tabel 5.3. Mõnede materjalide ja ainete isesüttivuse katseandmed

Aine või materjal	Isesüttimise konstandid				Isekuumenemis-temp. t_{isek} , $^\circ\text{C}$	Hõõgu-mistemp. $t_{hõõg}$, $^\circ\text{C}$	Isesüttimistemp. $t_{isesütt}$, $^\circ\text{C}$
	A	a	B	b			
Ehitusvilt	1,729	0,279	2,35	0,14	80	285	370
Puitkiudplaat	1,864	0,207	2,381	0,075	80	225	345
Mineraalvatt 19% bituumeni sisaldusega	2,002	0,134	2,313	0,119	130	-	420
Puuvill	2,018	0,1401	2,332	0,057	120	205	407
Turbapressplaat	1,76	0,248	2,271	0,1171	80	187	299

Plaadi eripind

$$S = 2 (1/1 + 1/1 + 1/0,03) = 70,6 \text{ [1/m]}$$

Valemist $\lg t_{\text{isesütt}} = A + a \lg S$ leiame kuivatamise minimaalse temperatuuri, mille juures on võimalik plaatide isesüttimine:

$$\lg t_{\text{isesütt}} = 1,76 + 0,248 \lg 70,6 = 1,76 + 0,248 \cdot 1,85 = 2,218$$

$$t_{\text{isesütt}} = 165^\circ\text{C} < t_{\text{hõõg}} = 187^\circ\text{C}$$

Aja soojendamise algusest kuni isesüttimiseni ($\tau_{\text{isesütt}}$) leiame valemist

$$\lg \tau_{\text{isesütt}} = (B - \lg t_{\text{isesütt}}) / b:$$

$$\lg \tau_{\text{isesütt}} = (2,271 - \lg 165) / 0,1171 = (2,271 - 2,18) / 0,1171 = 0,777$$

$$\tau_{\text{isesütt}} = 6 \text{ tundi}$$

Tulenevalt tingimustest $t_0 \leq 0,8 t_{\text{isesütt}} < t_{\text{hõõg}}$ või $< t_{\text{isesütt}}^*$

$$\tau_{\text{kuumaeg}}^{**} \leq 0,8 \tau_{\text{isesütt}}^{***}$$

kus $t_{\text{isesütt}}^*$ – isesüttimise temperatuur nendel ainult, millel puudub hõõgumine

$\tau_{\text{kuumaeg}}^{**}$ – materjali kuumenemise aeg

$\tau_{\text{isesütt}}^{***}$ – aeg kuumenemise algusest isesüttimiseni,

saame soojusisolatsiooni kuivatamise parameetrid:

$$t_0 = 0,8 t_{\text{isesütt}} = 0,8 \cdot 165 = 132^\circ\text{C}$$

$$\tau_{\text{kuumaeg}} = 0,8 \tau_{\text{isesütt}} = 0,8 \cdot 6 = 4,8 \text{ tundi}$$

5.4. Määrata soojusisolatsiooni plaatide(turbapressplaat) staabeldamise kõrgus, kui nad saavad lattu temperatuuril 100°C . Plaatide mõõdud on samad kui eelmises ülesandes.

Lahendus:

1. Võttes plaadi soojustehnilised suurused sarnasteks eelmise ülesandega (tabel 5.3), siis valemist

$$\lg S_{\text{lub}} \leq (\lg t_{\text{mat}} - A) / a,$$

kus t_{mat} – on materjali väljumistemperatuur kuivatist,

leiame staabelduse eripinna:

$$\lg S_{\text{lub}} = (\lg 100 - 1,76) / 0,248 = (2 - 1,76) / 0,248 = 0,967 \cdot S = 9,26 [1/\text{m}]$$

Eripinna valemist leiame staabelduse lubatud kõrguse h_{lub} :

$$9,26 = 2 (1 / 1 + 1 / 1 + 1 / h_{\text{lub}}), \quad h_{\text{lub}} = 0,38,$$

mis moodustab meile 12-13 plaati paksusega 3 cm.

Täiesti tõenäoliselt ei vasta see tuleohutusnõuetele:

$$t_{\text{mat}} = t_{\text{isesütt}} = 100^\circ > 0,8 t_{\text{isesütt}} = 0,8 \cdot 80^\circ\text{C} = 64^\circ\text{C}$$

Iseüttivuse ärahoidmiseks asetatakse kuumade plaatide vahele spetsiaalsed vaheliistud, mis tagavad plaatide jahtumise tingituna õhu liikumisest plaatide vahel (sellisel juhul ei ole vajadust staabelduse kõrgust limiteerida), või siis staabeldada sellistel tingimustel, mis leiti eelmises ülesandes

$$t_{\text{isesütt}} = 165^\circ\text{C} > t_{\text{mat}} = 100^\circ\text{C},$$

või siis juhul kui staabeldatud plaatide temperatuur vastab nõudele:

$$t_{\text{mat}} \leq 0,8 t_{\text{isesütt}}$$

Sellisel juhul isesüttimist ei toimu ning staabelduse kõrgus ei ole ka limiteeritud.

5.5. Kontrollida kas on täidetud tuleohutuse tingimused puuvilla kuivatamisel kamberkuivatis, kui puuvilla kihi paksus ja laius on vastavalt 0,1 ja 2,4 m ja kuivati pikkus 20 m. Kuivatusprotsess kestab 25 minutit ja kuivati temperatuur on 120 °C.

Lahendus:

Tabelist 5.3 leiame puuvilla kohta: $A = 2,018$; $a = 0,1401$; $B = 2,332$; $b = 0,057$;

$$t_{\text{isekuum}} = 120 \text{ °C} ; t_{\text{hõõg}} = 205 \text{ °C}.$$

Puuvilla kihi eripind on

$$S = 2 [(1 / 0,1) + (1 / 2,4) + (1 / 20)] = 20,9 [1 / \text{m}]$$

Isesüttimise temperatuuri $\lg t_{\text{isesütt}}$ leiame **valemist**

$$\lg t_{\text{isesütt}} = A + a \lg S$$

$$\lg t_{\text{isesütt}} = 2,018 + 0,1401 \cdot 1,32 = 2,203 ; t_{\text{isesütt}} = 160 \text{ °C}$$

$$120 \text{ °C} = t_{\text{isekuum}} < t_{\text{isesütt}} = 160 \text{ °C} > t_o = 120 \text{ °C} < t_{\text{isehõõg}} < = 205 \text{ °C}$$

Isegi juhul kui kuivati temperatuur võrduks isesüttimistemperatuuriga, siis kuivatuse kestvus oleks:

$$\lg \tau_{\text{isesüttäeg}} = (2,332 - \lg 160) / 0,057 = (2,332 - 2,203) / 0,057 = 0,509$$

$$\tau_{\text{isesüttäeg}} = 3,23 \text{ tundi} \gg \tau_{\text{soojaeg}} = 0,416 \text{ tundi}$$

Seega on puuvilla kuivatusprotsessil tuleohutustingimused täidetud.

5.6. Leida männipuidust vaheseinale vajalik krohvikihi paksus kui vooderduseta metallahjust tuleneva kiirguse tõttu on puidupinna temperatuur 110 °C. Õhu temperatuur ruumis on 25 °C. Krohvi ja männipuidu soojusjuhtivustegurid on vastavalt 0,6 ja 0,32 kkal / (m · h · deg). Ohutusteguriks võtta 1,5.

Lahendus:

Tabel 5.4. Põlevate soojusisolatsioonimaterjalidele lubatud piirtemperatuurid

Materjali nimetus	Tuleohutuse seisukohalt lubatud piirtemperatuur, °C
Puitkiudplaadid, turbapressplaadid, penoplastid (PVC,FF), männipuit	80
Kõik puiduliigid(väljaarvatud männipuit), penoplastid	100
Mineraalvatt, vineer, penoplast (FS)	120

Võttes tabelist 5.4 männipuidule $t_{\text{isekuum}} = 80 \text{ °C}$ ja asetades järgnevasse **valemisse** ülejäänud suurused, saame nõutava krohvikihi paksuse:

$$\delta_1 \geq \beta [(t_1 - t_{\text{lub}}) / (t_{\text{lub}} - t_f)] (\lambda_1 / \lambda_2)$$

$$\delta_1 = 1,5 [(110 - 80) / (80 - 25)] (0,32 / 0,6) = 0,0262 \text{ m} = 26,2 \text{ mm}$$

Tuleohutusnõuetele vastav krohvikihi paksus on 25 mm, seega leitud suurus väldib männipuust vaheseina mittesüttivuse.

5.7. Leida soojusvoo tihedus alumiiniumist ekraani (mustusaste on $\epsilon_{\text{ekr}} = 0,07$) puhul.

Kiirgava pinna mustusaste on temperatuuril $T_1 = 500 \text{ K}$ on $\epsilon_1 = 0,85$.

Ruumi seinte mustusaste on $\epsilon_2 = 0,91$. Ruumi õhu temperatuur on $t_2 = 25 \text{ °C}$.

Lahendus:

Määrame süsteemi: kiirgav pind – ekraan ja ekraan – ruumi seinte pinna mustusastmed vastavalt **valemitele**

$$\epsilon_{\text{tul}}(1, \text{ekr}) = 1 \left[\left(\frac{1}{\epsilon_1} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{ekr}}} \right) - 1 \right];$$

$$\epsilon_{\text{tul}}(\text{ekr}, 2) = 1 \left[\left(\frac{1}{\epsilon_{\text{ekr}}} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2} \right) - 1 \right];$$

$$\epsilon_{\text{tul}}(1, \text{ekr}) = 1 \left[\left(\frac{1}{0,85} \right) + \left(\frac{1}{0,07} \right) - 1 \right] = 0,0691$$

$$\epsilon_{\text{tul}}(\text{ekr}, 2) = 1 \left[\left(\frac{1}{0,07} \right) + \left(\frac{1}{0,91} \right) - 1 \right] = 0,0697$$

Soojusvoo tiheduse kiirgavalt pinnalt ruumi seintele ekraani olemasolul leiame järgneva **valemi** abil:

$$q_{1,2}' = \left[\left(\epsilon_{\text{tul}}(1, \text{ekr}) \cdot \epsilon_{\text{tul}}(\text{ekr}, 2) \right) / \left(\epsilon_{\text{tul}}(1, \text{ekr}) + \epsilon_{\text{tul}}(\text{ekr}, 2) \right) \right] \cdot C_0 \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right]$$

$$q_{1,2}' = 4,96 \left[0,0691 \cdot 0,0695 \right] / \left(0,0691 + 0,0695 \right) \cdot \left[(500/100)^4 - (298/100)^4 \right] =$$

$$= 95,6 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

Ekraanita oleks soojusvoo tihedus

$$q_{1,2} = 0,783 \cdot 4,96 \left[(500/100)^4 - (298/100)^4 \right] = 2125 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}),$$

kus $\epsilon_{\text{tul}}(1,2) = 1 \left[\left(\frac{1}{0,85} \right) + \left(\frac{1}{0,91} \right) - 1 \right] = 0,783$,

Seega väheneb soojusvoo tihedus seintele ekraani olemasolu korral $2125 / 95,6 = 22,2$ korda.

5.8. Määrata poleeritud alumiiniumist ekraanide arv (kaitsmaks tuletoorjujaid) gaasijoa tulekoonla pikaajalisel kustutamisperioodil. Tulekoonla temperatuur on 1400 °C ja selle mittekirka leegi mustusaste on $\epsilon_1 = 0,3$ (tabel 5.5). Inimese naha mustusaste võtta $\epsilon_2 = 0,95$. Poleeritud alumiiniumi mustusaste on $\epsilon_{\text{ekr}} = 0,045$. Tulekoonla vertikaalprojektsiooni pindala inimesele ohtlike kiirgusnurkade puhul on 12 m^2 .

Tabel 5.5. Lõpmatult paksu leegikihi mustusaste

Leegi olemus	Leegi mustusaste
Tulekoonla mittekirgas leek	0,30
Gaasi ja antratsiidi (kihina süütamisel)mittekirgas leek	0,40
Antratsiiditolmu kirgas leek	0,45
Lahjade süte kirgas leek	0,60
Lendaineterikaste kivisüte, puidu, turba jms leek	0,70
Masuudi kirgas leek	0,85
Bensiini kirgas leek	0,96...0,99

Lahendus:

Alustame järgmisest **valemist**, mille järgi leiame tulekoonla (leegi) antud pindalale vastava kiirgusvoo

$$Q_{1-2} = C_{1-2} \cdot F [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] = C_0 \varepsilon_{1-2} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F,$$

kus C_{1-2} on taandatud kiirgustegur, mis võrdub :

$$C_{1-2} = C_0 [(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1] = 1 / [(1/c_1) + (1/c_2)] - (1/C_0) \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$$

ε_{1-2} on taandatud mustusaste, mis võrdub :

$$\varepsilon_{1-2} = C_{1-2} / C_0 = 1 / [(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2)],$$

kus C_1 ja C_2 on kehade I ja II kiirgustegurid, $\text{kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$,

C_0 – absoluutselt musta keha kiirgustegur: $4,96 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$

$$q_{1,2} = Q_{1,2} / F_1 = [(4,96 \cdot 0,296) (400 + 273/100)^4 - (293/100)^4] / 12 = \\ = 9400 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

kus $\varepsilon_{\text{tul}(1,2)} = 1 / [(1/0,3) + (1/0,95) - 1] = 0,296$

valemi $\varepsilon_{\text{tul}} = 1 / [(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1]$ järgi

Süsteemi: „leek - ekraan” tuletatud mustusastme määrame järgmise **valemi** abil:

$$\varepsilon_{\text{tul}(1,\text{ekr})} = 1 / [(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_{\text{ekr}}) - 1]$$

$$\varepsilon_{\text{tul}(1,\text{ekr})} = 1 / [(1/0,3) + (1/0,045) - 1] = 0,0407$$

Võttes inimesele lubatud kiirgusvoo tasemeks $480 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ [560 W/m^2], siis järgneva **valemi** abil leiame poleeritud alumiiniumist ekraanide arvu „ekraniseeriva kilbi”) jaoks:

$$n = [(\varepsilon_{\text{tul}(1,\text{ekr})} \cdot q_{1,2}) / (\varepsilon_{\text{tul}(1,2)} \cdot q_{\text{lub}})] - 1$$

$$n = [(0,0407 \cdot 9400) / (0,296 \cdot 480)] - 1 \approx 1,7$$

võtame $n = 2$. Ekraniseerivat seinu on otstarbekas valmistada kerge karkassina (hea teiseldata!) jättes kahe alumiiniumist plaadi vahele isoleeriva õhuvahe (ekraniseeriva seinu üldine paksus on 20-30 mm).

5.9. Leida pihustatud veest kaitseseina parameetrid, mida on vaja teha klaasplastikust seinu põlemise leviku tõkestamiseks läbi tuletõkke seinas oleva avause. Avause pindala 12 m^2 ja tuleleegist tulenev kiirgusvoog on $23\,100 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Lahendus:

Leiame tabelist 5.1 klaasplastiku kriitilise kiirgusvoo $13\,200 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ja järgneva **valemi** järgi leiame veeseina optilise tiheduse:

$$i_\lambda = 2,303 \lg (q_{\text{kiirgus}} / q_{\text{lub}})$$

$$i_\lambda = 2,303 \lg (23\,100 / 13\,200) = 0,56$$

Veeseina paksuse leiame järgmise **valemi** abil:

$$\delta_{\text{sein}} = i_\lambda / K,$$

kus K on katseline kiirgusvoo nõrgendustegur, võrdub $2,8 \text{ m}^{-1}$ seinale lainepikkustel 1-3 μ

$$\delta_{\text{sein}} = i_\lambda / K = 0,56 / 2,8 = 0,2 \text{ m}$$

Võttes veepiiskade raadiuseks $r_0 = 70 \mu = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ ja kasutades **valemeid**

$$m_0 = 4/3 (\pi r_0^3 \gamma) \text{ ja } a \approx 2\pi r_0^2,$$

kus γ on vee erikaal, kg/m^3

ning valemi $M = (m_0/a) i_\lambda$ abil leiame vee kulu [kg/m^2] 1 m^2 kiirguse eest kaitstavale pinnale.

$$M = [(4\pi r_0^3 \gamma) / (3\pi r_0^2)] \cdot i_\lambda = 2/3 r_0^3 \gamma i_\lambda = 2/3 \cdot 7 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 0,56 = 0,261 \text{ kg/m}^2$$

Arvestades veepiiskade veeinas püsivuse ajaks 0,5 sekundit on vajalik veehulk

$$G = 2M = 2 \cdot 0,261 = 0,522 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Summaarne vee hulk tuletõkke seinas oleva ava kaitseks on

$$G_{\text{kogu}} = G \cdot F_{\text{avaus}} = 0,522 \cdot 12 = 0,626 \text{ kg/s}$$

5.10. Leida soojusvahetustegur põlemissaaduste ja ruumi seinte vahel (ruumi kõrgus on 2,7 m ja pindala 25 m^2) tingimustes, kus 30 minuti möödudes tulekahju algusest on ruumi temperatuur 800°C ja ruumi konstruktsioonipindade (seinte, lagi) temperatuur on 700°C . Põlevmaterjaliks on tavalise elamu puhul puit.

Lahendus:

Kuna toimub nii konvektiivne kui ka kiirgussoojusvahetus, siis leiame ülesandes summaarse soojusvahetusteguri.

1. Konvektiivne soojusvahetustegur. Kasutame piiramatut ruumala loomuliku konvektsiooni valemeid (vt soojusfüüsika õppematerjali).

Keskmine temperatuur põlemissaaduste piirpinnal

$$t_m = (800 + 700) / 2 = 750^\circ\text{C}$$

Temperatuuril 750°C on põlemissaaduste füüsikalised parameetrid järgmised (tabel L 2) :

$$\lambda_m = 0,0749 \text{ kkal} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}); \quad v_m = 122 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2; \quad \text{Pr}_m = 0,605$$

$$\beta_m = 1 / (273 + 750) = 9,78 \cdot 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$$

Grashoffi kriteerium on sellisel juhul

$$\text{Gr}_m = (9,78 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot 2,7^3 (800 - 700) / (122 \cdot 10^{-6})^2 = 13 \cdot 10^8.$$

Korrutise $(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_m = 13 \cdot 10^8 \cdot 0,605 = 7,85 \cdot 10^8 > 2 \cdot 10^7$ puhul on tegemist c ja n väärtustega **valemis** $\text{Nu}_m = c (\text{Gr Pr})_m^n$ vastavalt 0,135 ja $1/3$ (tabel 5.6).

Tabel 5.6. Konstantide c ja n väärtused

$(\text{GrPr})_m$	c	n
Vähem kui 10^{-3}	0,5	0
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
Enam kui $2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

Arvutame Nusselti kriteeriumi:

$$\text{Nu}_m = 0,135 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_m^{1/3} = 0,135 \cdot (7,85 \cdot 10^8)^{1/3} = 126$$

Sellisel juhul on konvektsiooni soojusvahetustegur

$$\alpha_k = (\text{Nu}_m \cdot \lambda_m) / h = (126 \cdot 0,0749) / 2,7 = 3,5 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

2. Kiirgus soojusvahetusteguri leidmisel kasutame vastavaid valemeid (vt Soojusfüüsika õppematerjale). Ruumi maht $V = F_{\text{ruum}} \cdot h = 25 \cdot 2,7 = 67,5 \text{ m}^3$.

Ruumi piiravate konstruktsioonide pindala sisemõõtmisel:

$$F = F_{p\delta} + F_{vl} + F_{se}$$

kus $F_{p\delta}$ – põranda pindala

F_{vl} – vahelae pindala

F_{se} – seinte pindala sisemõõtmisel

$$F = 25 + 25 + (4 \cdot 5 \cdot 2,7) = 104 \text{ m}^2.$$

Põlemissaaduste efektiivse kihi paksuse leiame järgmise **valemi** järgi:

$$l = m (V / F)$$

$$l = 3,6 (67,5/104) = 2,33 \text{ m}$$

Võttes puidu põlemissoojuseks 4000 kkal / kg, õhu liigteguriks 1,3 ning graafikult (joonis 5.6) leiame gaaside partsiaalrõhu

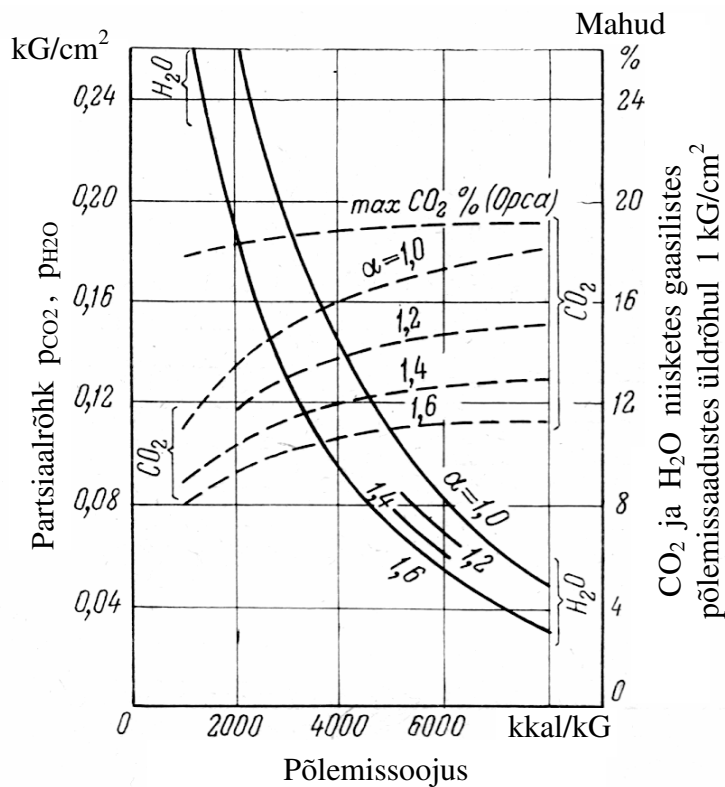
0,13 ata CO₂-le ja 0,11 ata H₂O-le

Siis $p_{\text{CO}_2} \cdot l = 0,13 \cdot 2,33 = 0,303 \text{ m} \cdot \text{ata}$

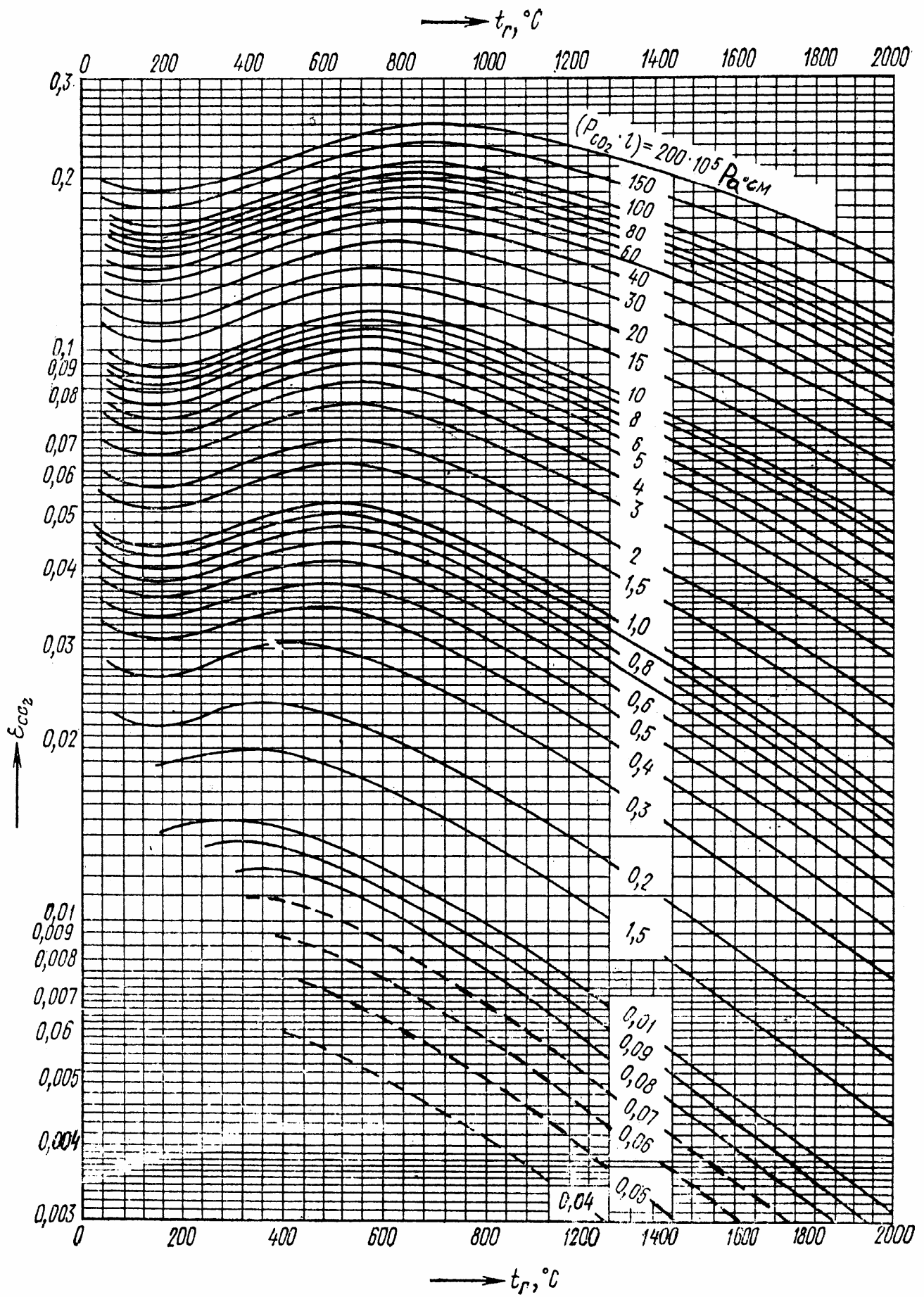
$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l = 0,11 \cdot 2,33 = 0,256 \text{ m} \cdot \text{ata}$

Graafikult (joonised 5.7 ja 5.8) leiame CO₂ ja H₂O mustusastmed gaasi temperatuuril 800 °C:

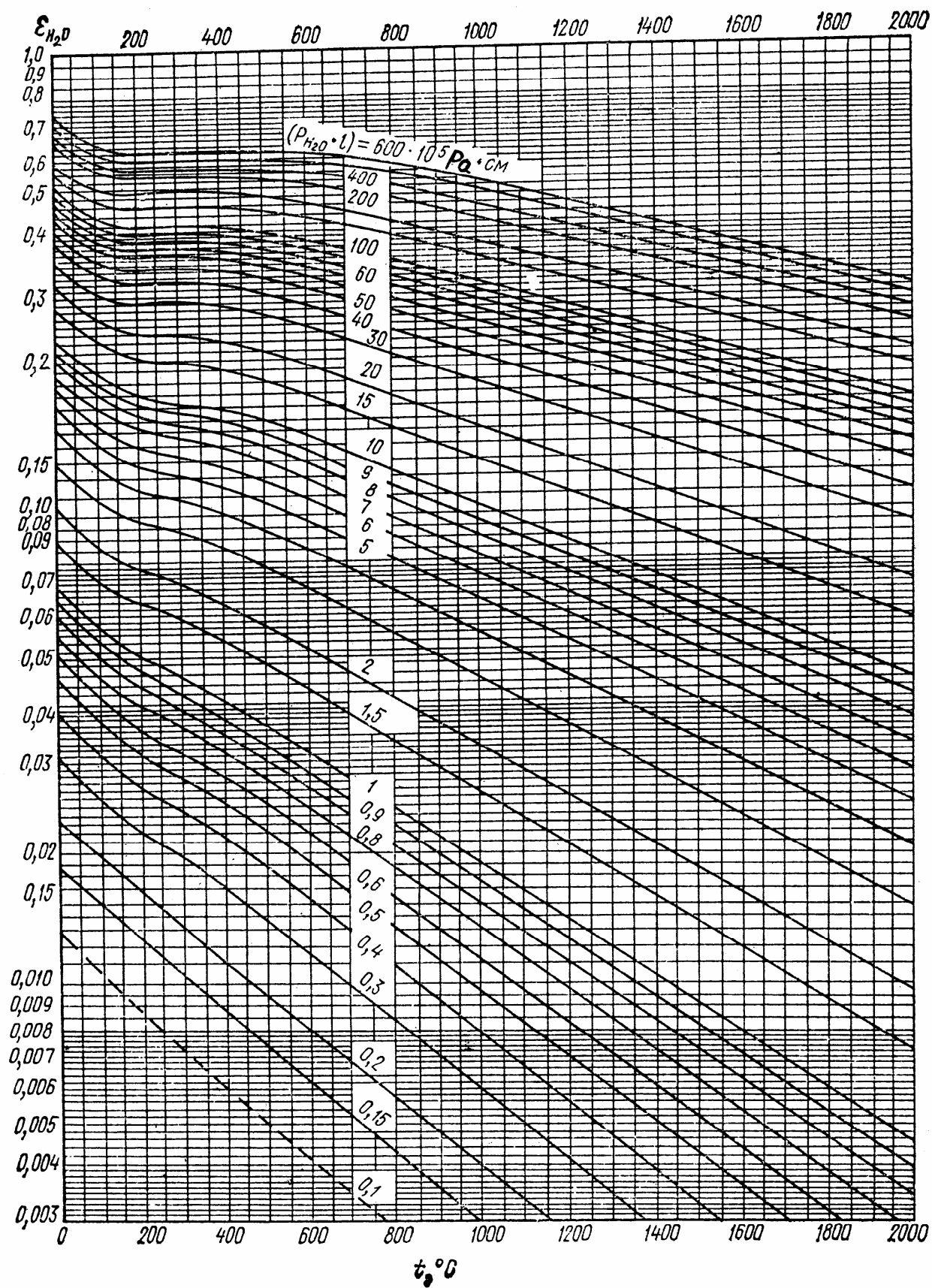
$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,15$ ja $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,21$



Joonis 5.6. CO₂ ja veeauru partsiaalrõhud tahkekütuse (väljaarvatud koks) põlemissaadustes üldrõhul 1 ata

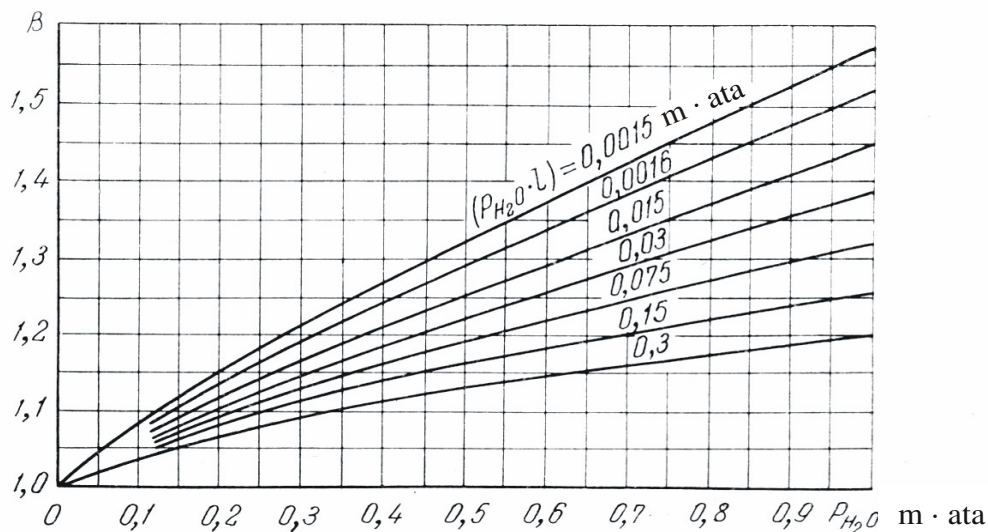


Joonis 5.7. Süsihappegaasi mustusaste segu täisrõhul 1 ata



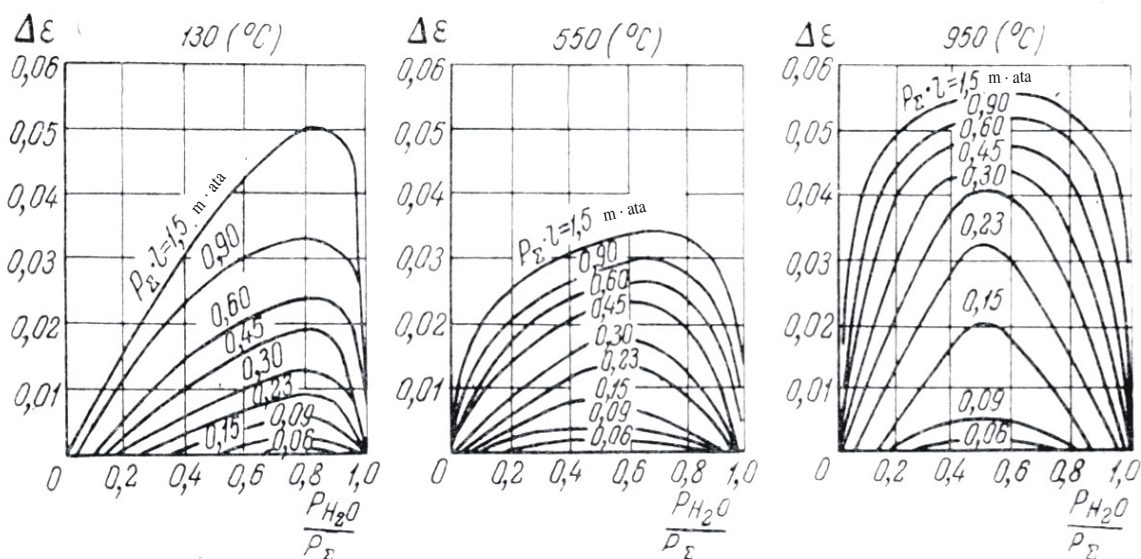
Joonis 5.8. Veeauru mustusaste segu täisrõhul 1 ata

Veeauru parandusteguri partsiaalrõhule $\beta = 1,05$ leiame graafikult (joonis 5.9).



Joonis 5.9. Veeauru partsiaallrõhku arvestav parandustegur mustusastme määramisel

Paranduse kogu CO₂ ja H₂O neeldusmisspektri ribadele leiame graafikult (joonis 5.10).



Joonis 5.10. Süsihappegaasi ja veeauru spektri neeldumisribade parandused

$p_{H_2O} / \sum p = 0,11/0,24 = 0,458$ ja $\sum p l = 0,24 \cdot 2,33 = 0,56$ (m · ata) juures leiame temperatuuri $t = 550$ °C juures $\Delta \epsilon_f = 0,023$ ja $t = 950$ °C juures $\Delta \epsilon_f = 0,049$ ning interpoleerimisel $t_f = 800$ °C jaoks $\Delta \epsilon_f = 0,036$.

Põlemissaaduste mustusastme leiame järgmise **valemi** järgi:

$$\epsilon_f = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_{H_2O} - \Delta \epsilon_f$$

$$\epsilon_f = 0,15 + 1,05 \cdot 0,21 - 0,036 = 0,334$$

Graafikult (joonis 5.7 ja 5.8) leiame seinte temperatuuri $t_w = 700$ °C juures ja

$$p_{CO_2} \cdot l (T_w/T_f) = 0,303 (700/800) = 0,267 \text{ (m · ata);}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l (T_{\omega}/T_f) = 0,256 (700/800) = 0,224 \text{ (m} \cdot \text{ata)};$$

väärtustel leiame tingliku mustusastme:

$$\varepsilon'_{\text{CO}_2} = 0,145 \text{ ja } \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2$$

Põlemissaaduste suhtelise neeldumisvõime leiame järgmiste **valemite** järgi:

$$A_{\text{CO}_2} = \varepsilon'_{\text{CO}_2} (T_f/T_{\omega})^{0,65} \text{ ja}$$

$$A_{\text{H}_2\text{O}} = \beta'_{\text{H}_2\text{O}} (T_f/T_{\omega})^n.$$

$$A_{\text{CO}_2} = 0,145 (800/700)^{0,65} = 0,158$$

$$A_{\text{H}_2\text{O}} = \beta \cdot 0,2 (800/700)^{0,45} = 1,05 \cdot 0,21 = 0,22$$

kus $n = 0,45$ kuivõrd $500 \text{ }^{\circ}\text{C} < t_{\omega} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C} < 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

$$\beta = 1,05 - \text{on varem leitud}$$

Paranduse CO_2 ja H_2O neeldumisribadele leiame graafikult (joonis 5.10)

$$p_{\text{H}_2\text{O}} / \sum p = 0,458 \text{ ja } \sum p \cdot l (T_{\omega}/T_f) = 0,24 \cdot 2,33 (700/800) = 0,49 \text{ (m} \cdot \text{ata)} \text{ korral}$$

leiame temperatuuril $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta A_f = 0,022$, temperatuuril $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta A_f = 0,047$ ja interpolatsioonil temperatuurile $t_{\omega} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta A_f = 0,034$.

Siis leiame gaasilise keskkonna suhtelise neeldumisvõime järgmise **valemi** järgi:

$$A_f = A_{\text{CO}_2} + A_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta A_f,$$

kus ΔA_f on CO_2 ja H_2O vastastikust kiirgumist ja neeldumist arvestav tegur

$$A_f = 0,158 + 0,22 - 0,034 = 0,344$$

Kiirgussoojusvoo leiame järgmise **valemi** järgi:

$$q_{f,\omega} = \varepsilon'_{\omega} \cdot c_0 [\varepsilon_f (T_f/100)^4 - A_f (T_{\omega}/100)^4]$$

$$q_{f,\omega} = 0,955 \cdot 4,96 [0,334 (800 + 273/100)^4 - 0,344 (700 + 273/100)^4] =$$

$$= 6170 \text{ kkal / m}^2 \cdot \text{h},$$

kus $\varepsilon'_{\omega} = (0,91 + 1) / 2 = 0,955$ valemi $\varepsilon'_{\omega} = 0,5 (\varepsilon_{\omega} + 1)$ järgi.

$$\varepsilon = 0,91 - \text{krohvi mustusaste (tabel L 6)}$$

Kiirgussoojusvahetustegur

$$\alpha_{\text{kiirgus}} = (q_{f,\omega}) / (t_f - t_{\omega}) = 6170 / (800 - 700) = 61,7 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$$

Seega on summaarne soojusvahetustegur:

$$\alpha_0 = 61,7 + 3,5 = 65,2 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg)}$$

Seega moodustab konvektiivne soojus sellisel juhul 2,5%. Kui arvestada aga leegi kiirgust, siis temperatuurist $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kõrgemal väheneb konvektiivse soojuse osa veelgi. See kinnitab asjaolu, et areneva tulekahju tingimustes võib konvektiivse soojuse arvestamata jätta.

Arvutused näitavad, et keskkonna temperatuuri tõusuga konvektiivne soojusvahetustegur väheneb ja kiirgus soojusvahetustegur suureneb.

5.11. Määrata ahjuava ja vastasoleva seina ohutu vahekaugus, kui kivisöe leegi temperatuur ahjus on $t_a = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (vt tabel 5.7). Ahjuava seina paksus, laius ja kõrgus on vastavalt 0,125, 0,26 ja 0,38 m. Ohutusteguriks on võetud 1,2 selle arvestusega, et ahjuava on avatud ainult perioodiliselt (kivisöe sisestamisel).

Lahendus:

Graafikult (joonis 5.11) leiame $t_a=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastava kiirgustiheduse $q_k=38000\text{ (kkal)/(m}^2\cdot\text{h)}$.

Graafikult (joonis 5.12) leiame ahjuruumi diafragmeerimistegurid (ristkülikukujulise ava kõver):

$$b/\delta = 0,26 / 0,125 = 2,08 \text{ puhul } k_d' = 0,75;$$

$$h/\delta = 0,38 / 0,125 = 3,04 \text{ puhul } k_d'' = 0,8;$$

siis $k_d = \sqrt{0,75 \cdot 0,8} = 0,774$ valemi $k_d = \sqrt{k_d' \cdot k_d''}$ järgi.

Kiirgustiheduse läbi ahjuava määrame järgmise **valemi** järgi:

$$q_k^{ava} = k_d \cdot q_k \text{ [kkal / (m}^2 \cdot \text{h)]},$$

kus k_d on ahjuruumi diafragmeerimistegur

$$q_k^{ava} = 0,774 \cdot 38000 = 29400 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h)}$$

$$\textbf{Valemi } \bar{l} = D (b+h) / 2bh,$$

kus D – kiirgava ja kiiritatava pinna vahekaugus, m

b, h – kiirgava pinna mõõtmed, m

vahendusel leiame suhteliste avade suurused:

$$\bar{l}_1 = 0,5 (0,26 + 0,38) / 2 \cdot 0,26 \cdot 0,38 = 0,5 \cdot 3,24 = 1,62$$

$$\bar{l}_2 = 0,75 \cdot 3,23 = 2,32$$

$$\bar{l}_3 = 1 \cdot 3,23 = 3,23$$

$$\bar{l}_4 = 1,25 \cdot 3,23 = 4,04$$

$$\bar{l}_5 = 1,5 \cdot 3,23 = 4,85$$

Valemi $q_{\omega} = \beta \cdot q_k^{ava}$ järgi arvutame antud vahemaa kiirgustiheduse, arvestades ohutusteguriga $\beta = 1,2$:

$$q_{\omega 1} = \beta \cdot q_k^{ava} \cdot q = 1,2 \cdot 29400 \cdot 0,6 = 35300 \cdot 0,6 = 21200 \text{ kkal / (m}^2 \cdot \text{h)}$$

$$q_{\omega 2} = 35300 \cdot 0,48 = 17000$$

$$q_{\omega 3} = 35300 \cdot 0,4 = 14100$$

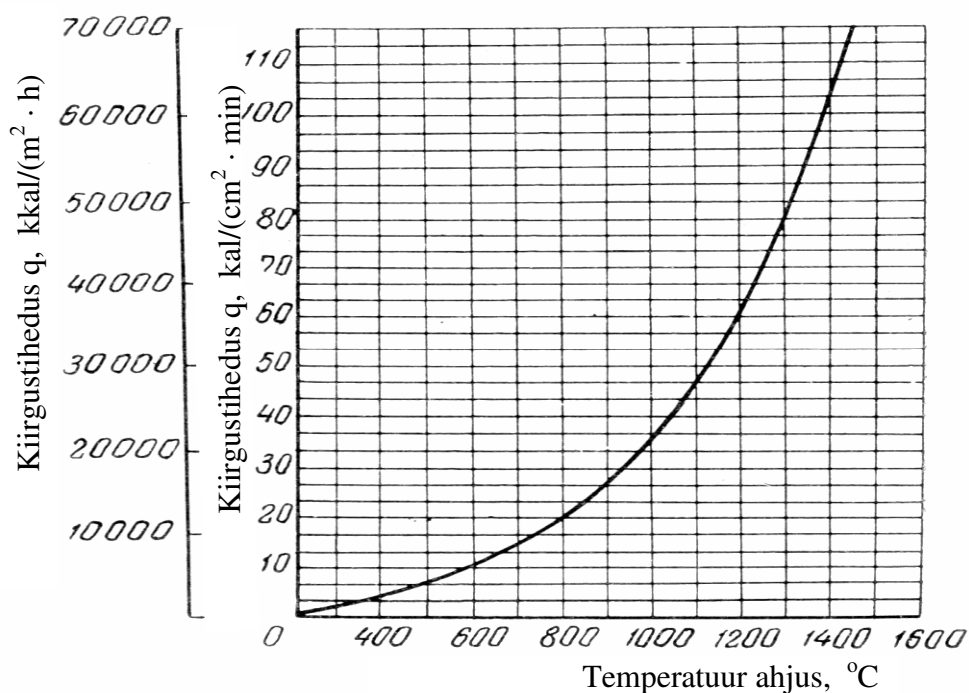
$$q_{\omega 4} = 35300 \cdot 0,34 = 12000$$

$$q_{\omega 5} = 35300 \cdot 0,3 = 10550$$

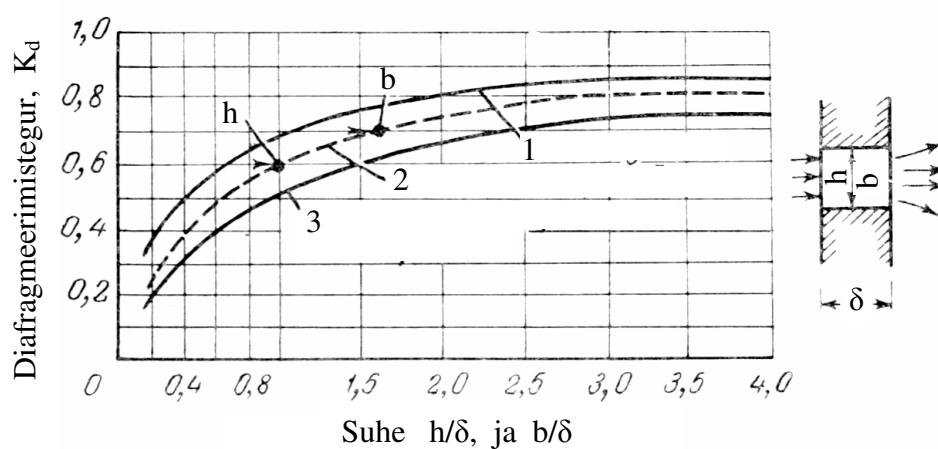
Kasutades saadud andmeid, joonistame graafiku $\beta \cdot q_{\omega} = f(D_i)$ (joonis 5.13).

Tabel 5.7. Mõnede ainete põlemisleekide keskmised temperatuurid

Põlevaine	Leegi temperatuur, °C
Turvas, masuut	1000
Puit, pruunsüsi, toornafta, traktoripetrooleum, diislikütus	1100
Kivisüsi, kautšuk ja kautsukitooted, bensiin	1200
Antratsiit, väävel	1300
Põlevgaasid	1300...1500
Magneesium, elektronsegu	2000

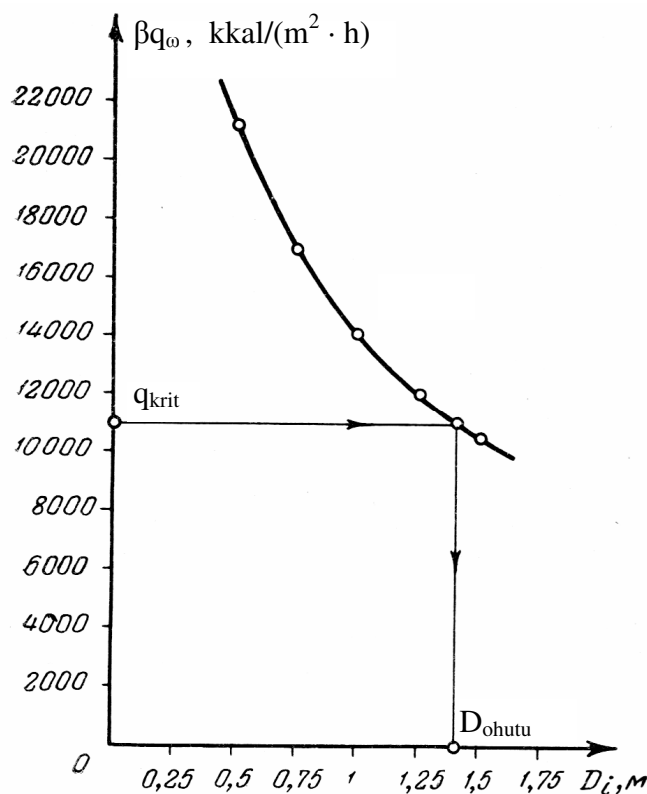


Joonis 5.11. Ahjuavast tuleneva kiirgusvoo sõltuvus temperatuurist



Joonis 5.12. Diafragmeerimisteguri määramise graafik.

1 – väljaulatuva kujuga küttekolle, 2 – ristkülikukujulise avaga ($h:b=1:2$) ja 3 – ümmarguse ja ruudukujulise avaga küttekolded



Joonis 5.13. Gaafik $\beta \cdot q_w = f(D_i)$ ohutu vahekauguse määramiseks ahjuavast

Võttes tabelist 5.1 $q_{\text{krit}} = 11\,000 \text{ kcal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ning märkides selle graafikule (joonis 5.13) leiame ohutuks kauguseks 1,4 m.

Tuleohutusreeglite järgi peab ahjuuks ja vastasoleva puitseina vaheline kaugus olema vähemalt 1,25 m.

5.12. Leida kahe puidust elamu vaheline tuleohutus vahemaa ning hinnata tuletõrjemeeskonna tööohutus parameetreid järgmistel tingimustel. Leegi mõõtmed tulekahjul $F_1 = 8 \cdot 12 \text{ m}$, leegi temperatuur $t_1 = 1100^\circ\text{C}$ (vt. tabel 5.7), mustusaste $\varepsilon_1 = 0,7$ (vt tabel 5.5). Puidu isesüttimistemperatuur on $T_{\text{isesütt}} = 679 \text{ K}$ (tabel 5.8), tema mustusaste $\varepsilon_1 = 0,85$ (tabel L 6). Ohutus-eguriks võetakse 1,5.

Tabel 5.8. Mõnede ainete ja materjalide isesüttimistemperatuurid

Aine või materjal	Isesüttimistemperatuur, K
Aviobensiin ja autobensiin A-74	573
Galoshabensiin	623
Ehitusvilt	643
Kuusepuit	670
Männipuit	679
Puuvill	680
Etanool	681
Atsetaatkuid	718
Katusepapp(ruberoid)	733

Lahendus:

1. Tuleohutusvahemaa määramine.

Jaotame leegi neljaks ühesuguseks ristkülikuks mõõtmetega $L_1 = 4$ m ja $L_2 = 6$ m. Andes ette majadevahelised kaugused 5, 10, 15 ja 20 m, arvutame suhted D_i / L_1 ja D_i / L_2

$$\begin{aligned} D_1 / L_1 &= 5/4 = 1,25; & D_1 / L_2 &= 5/6 = 0,834 \\ D_2 / L_1 &= 10/4 = 2,5; & D_2 / L_2 &= 10/6 = 1,668 \\ D_3 / L_1 &= 15/4 = 3,75; & D_3 / L_2 &= 15/6 = 2,502 \\ D_4 / L_1 &= 20/4 = 5; & D_4 / L_2 &= 20/6 = 3,336 \end{aligned}$$

Kasutades nomogrammi (joonis 5.1), leiame eelpool toodud D_i / L_1 ja D_i / L_2 arvvaartuste alusel iga ristküliku kiirgustegurid ning nende pindalasid summeerides saame:

$$\begin{aligned} \psi_{1,2}' &= 0,135; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,135 = 0,54; \\ \psi_{1,2}' &= 0,058; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,058 = 0,232; \\ \psi_{1,2}' &= 0,03; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,03 = 0,12; \\ \psi_{1,2}' &= 0,015; & \psi_{1,2} &= 4 \cdot 0,015 = 0,06; \end{aligned}$$

Tuletatud mustusastme saame **valemist**

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{tul}} &= \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{\text{tul}} &= 0,7 \cdot 0,85 = 0,595 \end{aligned}$$

Asetades **võrrandi**

$$\beta \cdot \varepsilon_{\text{tul}} \cdot c_0 \left[(T_f / 100)^4 - (T_{\text{isesütt}} / 100)^4 \right] \varphi_{1,2} \leq q_{\text{krit}}$$

kus T_f – tulekoonla (leegi) temperatuur, olenevalt põlevmaterjalist (tabel 5.7), K

$T_{\text{isesütt}}$ – tulekoonla kiirgust seova materjali minimaalne isesüttimistemperatuur, K

β – ohutustegur, mille väärtus on suurem ühest; ta oleneb tulekustutus komando 15 minutiga kohalesaabumise võimalusest ja automaatsete tulekustutusvahendite olemasolust (tööstustel)

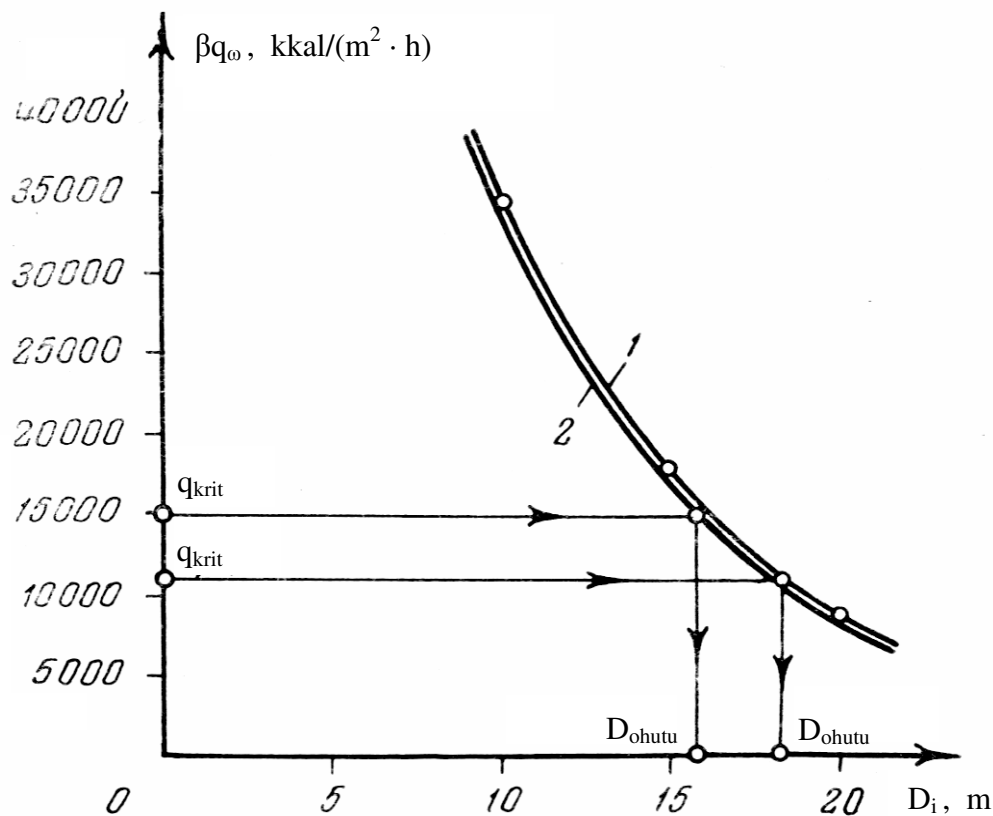
ε_{tul} – tuletatud mustusaste, mis määratakse eeltoodud valemiga, kus ε_1 on tulekoonla mustusaste (tabel 5.5) ja ε_2 – kiirgitatava pinna mustusaste (tabel L 6)

vasakusse poolde antud ja arvutatud suurused, leiame soojusvoo tiheduse elamute vahel:

$$\begin{aligned} D_1 &= 5 \text{ m} : \beta q_{l,\omega} = 1,5 \cdot 4,96 \cdot 0,595 \left[(1100 + 273 / 100)^4 - (679 / 100)^4 \right] 0,54 = \\ &= 14\,9000 \cdot 0,54 = 80\,600 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}) \\ D_2 &= 10 \text{ m} : \beta q_{l,\omega} = 149000 \cdot 0,32 = 34\,600 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}) \\ D_3 &= 15 \text{ m} : \beta q_{l,\omega} = 149000 \cdot 0,12 = 17\,900 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}) \\ D_4 &= 20 \text{ m} : \beta q_{l,\omega} = 149000 \cdot 0,06 = 8\,950 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned}$$

Nende andmete põhjal joonestame graafiku $\beta \cdot q_{l,\omega} = f(D_i)$ (joonis 5.14, kõver 1), alustades $D_2 = 10$ m ja $\beta \cdot q_{l,\omega} = 34\,600 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$; suuremad kiirgustihedused meie ülesandele mõju ei avalda.

Märkides graafikule $q_{\text{krit}} = 11000 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$, leiame elamute vahelise ohutu kauguse (tuleohutu vahemaa), mille väärtuseks saab 18,25 m.



Joonis 5.14. Tuleohutus vahekauguse ja tuletõrjetehnika ohutu kauguse määramise graafik.
1 –tuleohutusvahekaugus; 2 – tuletõrjetehnika ohutu vahekaugus

2. Tulekustutus-päästekomando tööohutust hindame järgmiselt:

a) millisel kaugusel võib olla kustutusauto(d) tulekahju pikaajalisel kustutamisel.

Kasutades $\psi_{1,2}$ eelmises osas arvutatud väärtusi ning arvestades bensiinipaagi mustusastmeks $\varepsilon_p = 0,82$ ning bensiini isesüttimistemperatuuriks $T_{isesütt} = 573 \text{ K}$, leiame soojusvoo tihedused 5, 10, 15 ja 20 m kaugusel tulekahjukoldest.

$D_1 = 5 \text{ m}$:

$$\begin{aligned} \beta \cdot q_{l,\omega} &= 1,5 \cdot 4,96 \cdot 0,7 \cdot 0,82 \left[(1373 / 100)^4 - (573 / 100)^4 \right] \cdot 0,54 = \\ &= 148\,500 \cdot 0,54 = 80\,200 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}); \end{aligned}$$

$D_2 = 10 \text{ m}$:

$$\beta \cdot q_{l,\omega} = 148\,500 \cdot 0,232 = 34\,400 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h});$$

$D_3 = 15 \text{ m}$:

$$\beta \cdot q_{l,\omega} = 148\,500 \cdot 0,12 = 17\,800 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h});$$

$D_4 = 20 \text{ m}$:

$$\beta \cdot q_{l,\omega} = 148\,500 \cdot 0,06 = 8\,900 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}).$$

Joonestades kiirgustiheduse olenevuse graafiku kaugusest tulekahjukoldest (2. kõver joonisel 5.14 langeb praktiliselt kokku 1. kõveraga), märgime sellel väärtuse $q_{kriit} = 15\,000 \text{ kkal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (kehtib bensiinile) ja leiame ohutu kauguse kustutusautole, see on 15,75 m.

b) kaitseriisteteta inimestele ohutu kauguse leidmine tulekoldest.

Arvestades kiiritustegurite vähenemistendentsi nomogrammi kasutades (joonis 5.1), võtame $\psi_{1,2} = 0,03$ $D_5 = 25$ m puhul;

$$\psi_{1,2} = 0,015 \quad D_6 = 30 \text{ m puhul}; \quad \psi_{1,2} = 0,0075 \quad D_7 = 35 \text{ m puhul};$$

$$\psi_{1,2} = 0,00375 \quad D_8 = 40 \text{ m puhul} \quad \text{ja} \quad \psi_{1,2} = 0,001875; \quad D_9 = 45 \text{ m puhul};$$

Kiirgustiheduse nendel kaugustel leiame jälle ülaltoodud **valemit** $\beta \cdot \epsilon_{\text{tul}} \leq q_{\text{krit}}$ kasutades

$$D_5 = 25 \text{ m: } \beta \cdot q_{l,\omega} = 1,5 \cdot 4,96 \cdot 0,665 \cdot [(1373 / 100)^4 - (343 / 100)^4] \cdot 0,03 = \\ = 177000 \cdot 0,03 = 5320 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}).$$

$$D_6 = 30 \text{ m: } \beta \cdot q_{l,\omega} = 177000 \cdot 0,015 = 2650 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$D_7 = 35 \text{ m: } \beta \cdot q_{l,\omega} = 177000 \cdot 0,0075 = 1330 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$D_8 = 40 \text{ m: } \beta \cdot q_{l,\omega} = 177000 \cdot 0,00375 = 655 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

$$D_9 = 45 \text{ m: } \beta \cdot q_{l,\omega} = 177000 \cdot 0,001875 = 334 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

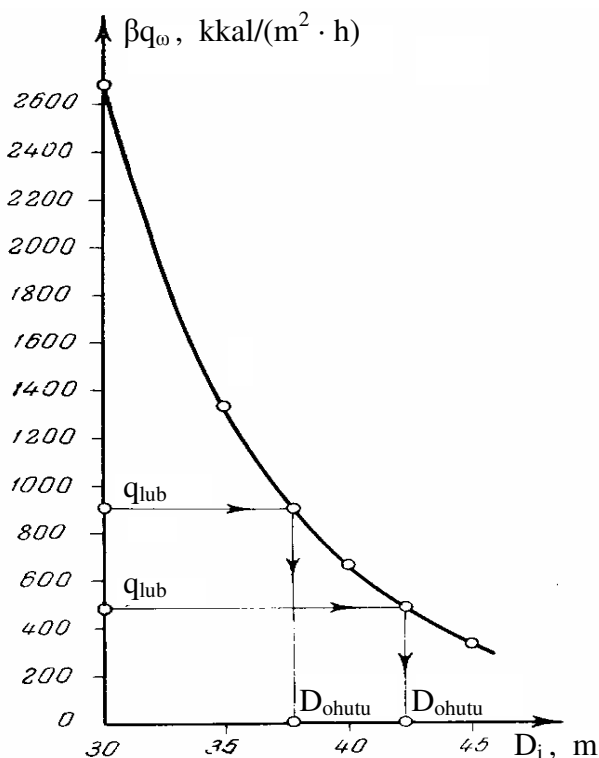
kus $T = 343 \text{ K}$ – inimorganismile lubatud kiirguse temperatuuri piirnorm

$$\epsilon_{\text{tul}} = 0,7 \cdot 0,95 = 0,665 - \text{valemi } \epsilon_{\text{tul}} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \text{ järgi}$$

$$\epsilon_2 = 0,95 - \text{inimese naha mustusaste.}$$

Saadud andmete alusel joonestame kiirgustiheduse sõltuvuse graafiku kaugusest tulekahju allikast (joonis 5.15), kusjuures alustame suurustest $D_6 = 30$ m ja $\beta \cdot q_{l,\omega} = 2650 \text{ kkal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Märkides graafikule $q_{\text{lub}} = 900$ ja $q_{\text{lub}} = 480 \text{ kkal} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ leiame ohutu kauguse lühi- ja pikaajaliseks töötamiseks kaitseriietuseta tulekahjutsoonis vastavalt 37,75 ja 41,75 m.

Sellised arvutused võimaldavad arvestada ohutuse aspekte operatiivplaanide tegemisel.



Joonis 5.15. Kiirgustiheduse sõltuvus kaugusest $\beta \cdot q_{l,\omega} = f(D_i)$ tulekahjuallikast määramaks kaitseriietuseta inimeste ohutut kaugust

5.13. Kaks paralleelset musta riba laiusega $a = 1,5 \text{ m}$ asuvad teineteisest 2 m kaugusel. Ribade pikkus on tunduvalt suurem nende laiusest. Ribade temperatuurid on $t_1 = 540^\circ\text{C}$ ja $t_2 = 400^\circ\text{C}$. Arvutada kiirgusvoo suurus ribade vahel, arvestatuna pikkusühikule.

Vastus: $Q = 6570 \text{ W/m}$

5.14. Malmahju hõõguva külgliseina pinna temperatuur on $t_1 = 650^\circ\text{C}$. Ahjust $h = 0,5 \text{ m}$ kaugusel on puidust vahesein, mille isesüttimistemperatuur on $t_2 = 295^\circ\text{C}$. Määrata kiirgusvoo maksimaalne suurus ja hinnata vaheseina süttimisvõimalust, kui malmahju kiirgava pinna mõõtmed on $d = 0,7 \text{ m}$ ja $l = 1 \text{ m}$.

Vastus: $q = 11624 \text{ W/m}^2$

5.15. Terasest gaasitoru diameetriga $D = 500 \text{ mm}$ asetseb $h = 0,2 \text{ m}$ kaugusel piki põlevmaterjalist seinast. Gaasitoru sein temperatuur on $t_1 = 650^\circ\text{C}$, mustusaste $\varepsilon_1 = 0,8$, põlevmaterjalist pinna mustusaste on $\varepsilon_2 = 0,9$ ja isesüttimistemperatuur $t_2 = 345^\circ\text{C}$. Leida resulteeriva kiirgusvoo tihedus gaasitoru pinnalt tema raadiuse normaali suunas põlevmaterjalist pinna elementaarpinna dF kohta.

Vastus: $q = 13437 \text{ W/m}^2$

5.16. Ahjusuu mõõtmed on $a = 25 \text{ cm}$; $b = 50 \text{ cm}$. Ahju sein paksus on $\delta = 12,5 \text{ cm}$. Ahjus põleb kivisüsi, mille leegi temperatuur on $t_1 = 1200^\circ\text{C}$ ja mustusaste $\varepsilon_1 = 0,7$. Ahjusuu on 1 m kaugusel puidust seinast, mille süttimistemperatuur $t_2 = 240^\circ\text{C}$, mustusaste on $\varepsilon_2 = 0,9$. Leida leegi resulteeriva kiirgusvoo tihedus läbi ahjusuu puidust seinale.

Vastus: $q = 3758 \text{ W/m}^2$

5.17. Leida puidust hoonete tuleohutu vahekaugus järgmistel tingimustel: tulekoonla mõõtmed tulekahjul $F_1 = 8 \times 12 \text{ m}$, tema temperatuur $t_1 = 1100^\circ\text{C}$, mustusaste $\varepsilon_1 = 0,7$. Puidu isesüttimistemperatuur $T_{is} = 568 \text{ K}$, tema mustusaste $\varepsilon_2 = 0,9$. Ohutusteguriks võtta $1,5$.

Vastus: 21 m

5.18. Leida tuletõrjajate-päästjatele ohutu vahemaa gaasijoa tulekoonla kustutamistöödel. Tulekoonla mõõtmed on $h = 20 \text{ m}$ ja $b = 8 \text{ m}$, temperatuur $t_t = 1500^\circ\text{C}$, mustusaste $\varepsilon_t = 0,3$. Bensiini A-76 isesüttimistemperatuur on $T_{bis} = 573 \text{ K}$, kustutusauto kütusepaagi mustusaste $\varepsilon_p = 0,82$, kriitiline soojusvoog $q_{krit} = 17500 \text{ W/m}^2$.

Vastus: 8 m

5.19. Leida paigaldatava gaasitoru diameetriga $D = 700 \text{ mm}$ ohutu vahekaugus põlevast materjalist seinast, mille isesüttimistemperatuur on $T_{is} = 500 \text{ K}$ järgmistel tingimustel: gaasitoru pinna temperatuur $t_1 = 700^\circ\text{C}$, mustusaste $\varepsilon_1 = 0,86$, põlevmaterjalist seinast mustusaste on $\varepsilon_2 = 0,92$, soojusvoo kriitiline tihedus on $q_{krit} = 9800 \text{ W/m}^2$, ohutustegur $\beta = 1,2$.

Vastus: $1,25 \text{ m}$

5.20. Kustutusauto kaitseks gaasijoa tulekoonla kustutamisel kasutati poleeritud teraslehest ekraani, mille mustusaste on $\varepsilon_e = 0,12$. Arvutada kiirgusvoo tihedus auto kütusepaagile, kui on teada: tulekoonla mõõtmed on kõrgus $h = 8$ m, laius $b = 3$ m ja temperatuur 1400°C ning tema mustusaste on $\varepsilon_1 = 0,3$; kütusepaagi mustusaste on $\varepsilon_2 = 0,82$, bensiini A-76 isesüttimistemperatuur on $T_{is} = 573$ K; auto kaugus tulekoonlast on 10 m. Leidke ka ekraani temperatuur T_e .

Vastus: $T_e = 813$ K; $q = 2169$ W/m²

5.21. Leida staabeldatud puitmaterjalide tuleohutu vahekaugus, kui võimalikul tulekahjul on tulekoonla mõõtmed $F_t = 10 \times 12$ m, tema temperatuur $t_t = 1100^\circ\text{C}$, mustusaste on $\varepsilon_t = 0,7$; puidu isesüttimistemperatuur on $T_{is} = 568$ K ja mustusaste on $\varepsilon_2 = 0,9$. Ohutusteguriks võtta $\beta = 1,5$.

Vastus: $r = 23,5$ m

5.22. 25 mm paksuse süsihappegaasi kihi läbimisel kiirguse spektraalne intensiivsus vähenes 2 korda. Mitu korda väheneb ta aga 45 mm paksuse süsihappegaasi kihi läbimisel?

Vastus: väheneb 3,48 korda

5.23. Ehitustarindite tulepüsivuskatsete läbiviimisel leekahjus (katseahjus) on seal gaaside temperatuur kogu ahju mahus ühtlaselt 1000°C . Ahju maht on $V = 13$ m³, katseava pindala on $F = 40$ m². Põlemisgaaside üldine rõhk on $p = 98,1$ kPa, põlemisgaaside koostises on 13%(maht) süsihappegaasi ja 10%(maht) veeauru. Arvutage mustusaste ja põlemisgaaside omakiirgus leekahjus.

Vastus: $\varepsilon_r = 0,2335$; $E_{ok} = 34765$ W/m²

5.24. Auru ülekuumendi kujutab endast torukimpu, torusid välisläbimõõduga 40 mm, mis on paigutatud malekujuliselt ühesuguse sammuga põiki ja pikisuunas $s_1 = s_2 = 2d$. Torukimpu ümbritsevate põlemisgaaside sisenemistemperatuur on $t_{r1} = 1200^\circ\text{C}$ ja väljumisel on $t_{r2} = 800^\circ\text{C}$ ja nad sisaldavad 12%(maht) CO₂ ja 9%(maht) H₂O. Gaaside üldrõhk on $p = 1$ bar. Määrata kiirgussoojuse äraandetegur põlemisgaasidelt torukimbu torudele, kui keskmine torude temperatuur on $t_t = 500^\circ\text{C}$ ja nende mustusaste on $\varepsilon_t = 0,82$.

Vastus: $\alpha_k = 16$ W/(m² · K)

5.25. Määrata kiirgussoojusvoo tihedus ja kiirgussoojuse äraandetegur suitsugaaside ja lõõri seinte vahel. Suitsugaasid sisaldavad 13%(maht) CO₂ ja 11 %(maht) H₂O ning nende üldrõhk on $p = 1$ bar, lõõri sisenemistemperatuur on $t_{r1} = 500^\circ\text{C}$ ja väljumisel $t_{r2} = 400^\circ\text{C}$. Lõõri kõrgus on $h = 4$ m ja ristlõige on $a \times b = 50 \times 25$ cm. Lõõri seinte temperatuur on $t_s = 350^\circ\text{C}$ ja nende mustusaste on $\varepsilon_s = 0,94$.

Vastus: $\alpha_k = 9,914$ W/(m² · K); $q_k = 991,4$ W/m²

LISAD

Tabel L 1. Kuiva õhu füüsikalised parameetrid atmosfäärirõhul

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$c_p, \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	Pr
-20	1,395	1,009	2,23	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
20	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
40	1,128	1,005	2,75	16,96	0,699
60	1,06	1,005	2,89	18,97	0,696
80	1	1,009	3,04	21,09	0,692
100	0,946	1,009	3,2	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,33	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,48	27,8	0,684
160	0,815	1,017	3,63	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,77	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,92	34,85	0,68
250	0,674	1,038	4,26	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,6	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,89	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,2	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,73	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,2	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,69	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,15	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,61	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,05	177,1	0,719

Tabel L 2. Suitsugaaside füüsikalised parameetrid

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$c_p, \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	Pr
0	1,295	1,043	2,28	12,2	0,72
100	0,95	1,068	3,12	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4	32,8	0,67
300	0,617	1,122	4,83	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,68	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,54	76,3	0,63
600	0,405	1,214	7,4	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,25	112,1	0,61
800	0,33	1,264	9,13	131,8	0,6
900	0,301	1,29	9,98	152,1	0,59
1000	0,275	1,306	10,9	173,4	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	197,1	0,57
1200	0,24	1,34	12,62	221	0,56

Parameetrid on antud tingimusel $p = 10^5 \text{ Pa}$; $p_{\text{CO}_2} = 0,13 \cdot 10^5 \text{ Pa}$;
 $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; $p_{\text{N}_2} = 0,76 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

Tabel L 3. Veeauru füüsikalised parameetrid

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}$ Pa	ρ kg/m ³	r kJ/kg	c_p kJ/(kg · °C)	$\lambda \cdot 10^2$ W/m · °C	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	Pr
100	1,013	0,598	2257	2,135	2,37	20,02	1,08
110	1,433	0,826	2230	2,177	2,49	15,07	1,09
120	1,985	1,121	2202	2,207	2,59	11,46	1,09
130	2,701	1,496	2174	2,257	2,69	8,85	1,11
140	3,614	1,966	2145	2,315	2,79	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2114	2,395	2,88	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2082	2,479	3,01	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2050	2,583	3,13	3,57	1,21
180	10,027	5,157	2015	2,709	3,27	2,93	1,25
190	12,553	6,394	1979	2,856	3,42	2,44	1,3
200	15,551	7,862	1941	3,023	3,55	2,03	1,36
210	19,08	9,588	1900	3,199	3,72	1,71	1,41
220	23,201	11,62	1853	3,408	3,9	1,45	1,47
230	27,979	13,99	1813	3,634	4,09	1,24	1,54
240	33,48	16,76	1766	3,881	4,29	1,06	1,61
250	39,776	19,98	1715	4,158	4,52	0,916	1,68
260	46,94	23,72	1661	4,468	4,8	0,794	1,75
270	55,05	28,09	1605	4,815	5,11	0,688	1,82
280	64,19	33,19	1542	5,234	5,48	0,6	1,9
290	74,45	39,15	1476,3	5,694	5,83	0,526	2,01
300	85,92	46,21	1404,2	6,281	6,27	0,461	2,13
310	98,7	54,58	1325,2	7,118	6,84	0,403	2,29
320	112,9	64,72	1237,8	8,207	7,52	0,353	2,5
330	128,65	77,1	1139,7	9,881	8,26	0,31	2,86
340	146,08	92,76	1027	12,357	9,3	0,272	3,35
350	165,37	113,6	893,5	16,246	10,7	0,234	4,03
360	186,74	144	719,3	23,029	12,79	0,202	5,23
370	210,53	203	438,4	56,525	17,1	0,166	11,1

Tabel L 4. Vee füüsikalised parameetrid küllastuspiiril

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}$ Pa	ρ kg/m ³	c_p kJ/(kg · °C)	$\lambda \cdot 10^2$ W/m · °C	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	$\sigma \cdot 10^5$ N/m	$\beta \cdot 10^4$ 1/°C	Pr
0	1,013	999,9	4,212	55,1	1,789	75,6	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	57,5	1,306	74,1	+0,7	9,52
20	1,013	998,2	4,183	59,9	1,006	72,6	1,82	7,02
30	1,013	995,7	4,175	61,8	0,805	71,2	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	63,5	0,659	69,6	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,175	64,8	0,556	67,6	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	65,9	0,478	66,2	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	66,8	0,415	64,4	5,7	2,55
80	1,013	971,8	4,195	67,5	0,365	62,5	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	68	0,326	60,6	6,95	1,95
100	1,01	958,4	4,22	68,3	0,295	58,8	7,52	1,75
120	1,99	943,1	4,25	68,6	0,252	54,8	8,64	1,47
140	3,61	926,1	4,287	68,5	0,217	50,7	9,72	1,26
160	6,18	907,4	4,346	68,3	0,191	46,6	10,7	1,1
180	10,03	886,9	4,417	67,5	0,173	42,3	11,9	1
200	15,55	863	4,505	66,3	0,158	37,7	13,3	0,93
220	23,2	840,3	4,614	64,5	0,148	33,2	14,8	0,89
240	33,48	813,6	4,756	62,8	0,141	28,5	16,8	0,87
260	46,94	784	4,949	60,5	0,135	23,7	19,7	0,87
280	64,19	750,7	5,23	57,5	0,131	19,1	23,7	0,9
300	85,92	712,5	5,736	54	0,128	14,4	29,2	1,97
320	112,9	667,1	6,574	50,6	0,128	9,81	38,2	1,11
340	146,08	610,1	8,165	45,7	0,127	5,67	53,4	1,39
360	186,74	528	13,985	39,6	0,126	2,02	109	2,35

Tabel L 5. Mõnede vedelike soojusfüüsikalised omadused

Vedelik	$t, ^\circ\text{C}$	ρ kg/m^3	c_p $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	λ $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6$ m^2/s	Pr
Bensool	0	900	1,5	0,15	0,965	8,76
	20	879	1,61	0,141	0,685	6,66
	50	846,6	1,78	0,139	0,518	5,6
Difenüül- segu	100	995	1,88	0,126	1,01	15
	130	970	2,01	0,121	0,746	12
	160	945	2,17	0,116	0,574	10,3
	200	912	2,34	0,111	0,446	8,6
Masuut	—10	888,6	1,49	0,113	83	1017
	0	872,5	1,545	0,112	70,5	866
	50	862,1	1,85	0,108	7,58	111
Metüül- alkohol	20	791	2,47	0,21	0,69	6,84
	50	765	2,53	0,207	0,52	4,98
Etüül- alkohol	20	789,5	2,41	0,185	1,83	18,6
	40	772,5	2,62	0,178	1,4	16
	60	754,1	2,83	0,174	0,99	12,1
	80	734,8	3,04	0,159	0,6	8,4

Tabel L 6. Erinevate materjalide täiskiirguse mustusaste

Materjali nimetus	t, °C	ε
METALLID		
Alumiinium, poleeritud	225 – 575	0,09 – 0,057
Alumiinium, kare pind	26	0,055
Raud, poleeritud	425 – 1020	0,144 – 0,377
Raud, valatud, töötlemata	925 – 1115	0,87 – 0,95
Teras, valatud, poleeritud	770 – 1040	0,52 – 0,56
Malm, poleeritud	200	0,21
Malm, oksüdeeritud 600 °C juures	200 – 600	0,64 – 0,78
Malm, kare pind, tugevalt oksüdeeritud	40 – 250	0,95
Pronks, oksüdeeritud	200 – 600	0,61 – 0,59
Kroom	38 – 538	0,8 – 0,26
Tsink, poleeritud	225 – 325	0,045 – 0,53
Tsingitud lehtraud, kõrgläikeline	28	0,228
Tsingitud lehtraud, hall, oküdeeritud	24	0,276
TULEKINDLAD-, EHITUS- JA ISOLATSIOONIMATERJALID		
Tulekindlad materjalid, nõrgalt kiirgavad	500 – 600	0,65 – 0,70
Tulekindlad materjalid, nõrgalt kiirgavad	1000	0,75
Tulekindlad materjalid, tugevalt kiirgavad	500 – 600	0,80 – 0,85
Tulekindlad materjalid, tugevalt kiirgavad	1000	0,85 – 0,90
Šamott-tellis, glasuuritud	1100	0,75
Silikaattellis	1230	0,66
Punane tellis, kare pind	20	0,93
Kips	20	0,8 – 0,9
Karedapinnaline lubjakrohv	10 – 90	0,91
Hallmarmor	22	0,93
Lameklaas	22	0,94
Paber	20	0,8 – 0,9
Vesi	0 – 100	0,95 – 0,96
Hööveldatud puit	20	0,8 – 0,9
Katuse tõrvapapp, ruberoid	20	0,93
Valge email metallpinnal	19	0,9
Must läikiv lakk metallpinnal	25	0,88
Must lakk, matt	40 – 95	0,98
Eri värvi õlivärv	100	0,92 – 0,96
Alumiiniumvärvid erineva Al sisaldusega	100	0,27 – 0,67
Alumiiniumvärv peale kuumutamist 325 °C-ni	150 – 315	0,35

KASUTATUD KIRJANDUS

1. V.G.Limonov i dr. Zadacnik po termodinamike i teploperedace, Moskva, 1996
2. V.V.Andrejev i dr. Zadacnik po termodinamike i teploperedace, Moskva, 1999
3. P.N.Romanenko i dr. Teploperedaca v pozarnom dele, Moskva, 1969
4. J.P.Holman, Heat Transfer, 7th Ed, 1990
5. V.Hyttinen, Palofysiikka, 2000
6. A.Talvari, Soojusfüüsika, Sisekaitseakadeemia, Tallinn, 2004